

Том 22, № 3

2018

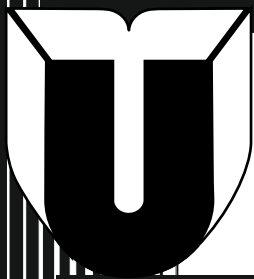
ISSN 1814-3520 (print)
ISSN 2500-1590 (online)

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ



ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2018



Том 22, № 3

2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 22, № 3

2018

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Редакционная коллегия

СУСЛОВ К.В., кандидат технических наук, профессор 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)

АЗАРОВ В.Н., доктор технических наук, профессор Московского института электроники и математики Национального исследовательского университета Высшей школы экономики (г. Москва, Россия)

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

БОРОВИКОВ Ю.С., доктор технических наук, проректор Национального исследовательского Томского политехнического университета (г. Томск, Россия)

ВОРОПАЙ Н.И., член-корреспондент РАН, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, научный руководитель Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (г. Иркутск, Россия)

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

МАМЯЧЕНКОВ С.В., доктор технических наук, профессор Уральского Федерального университета им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Россия)

ПАНТЕЛЕЕВ В.И., доктор технических наук, профессор Сибирского федерального университета (г. Красноярск, Россия)

ПЕТРОВ А.В., доктор технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

СИТНИК Л.Е., доктор-инженер, профессор, заведующий кафедрой Транспортной техники Вроцлавского политехнического университета (Польша)

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

ТИХОМИРОВ А.А., доктор экономических наук, профессор университета ИНХА (г. Инчон, Республика Корея)

ФЕДОТОВ А.И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

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

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания – ежемесячно

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 редакции:

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ауд. Д-119

e-mail: vestnik@istu.edu

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 3

2018

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

Editorial board

SUSLOV K.V., Candidate of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University, Editor-in-Chief (Irkutsk, Russia)

NEMCHINOVA N.V., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy of Irkutsk National Research Technical University, Deputy Editor in Chief (Irkutsk, Russia)

AZAROV V.N., Doctor of technical sciences, Professor of Moscow Institute of Electronics and Mathematics of Higher School of Economics National Research University (Moscow, Russia)

BAZHIN V.Y., Doctor of technical sciences, Dean of the Faculty of Mineral Raw Materials Processing of the St. Petersburg Mining University (Saint Petersburg Mining University) (Saint Petersburg, Russia)

BOROVIKOV Y.S., Doctor of technical sciences, Pro-Rector of National Research Tomsk Polytechnic University (Tomsk, Russia)

VOROPAI N.I., Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Doctor of technical sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Scientific Advisor of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS (Irkutsk, Russia)

ZAIDES S.A., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Machine-Building Technologies and Materials of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

MAMYACHENKOV S.V., Doctor of technical sciences, Professor of the Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russia)

PANTELEEV V.I., Doctor of technical sciences, Professor of Siberian Federal University (Krasnoyarsk, Russia)

PETROV A.V., Doctor of technical sciences, Professor of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

SITNIK L.E., Doctor-Engineer, Professor, Head of the Department of Transport Technology of Wrocław University of Science and Technology (Poland)

STYCHINSKI Z.A., Professor of the Otto von Guericke University (Magdeburg, Germany)

TIKHOMIROV A.A., Doctor of Economics, Professor of the INHA University (Incheon, Republic of Korea)

FEDOTOV A.I., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Transport of Irkutsk National Research Technical University (Irkutsk, Russia)

BERTHOLT SCHOLTES, Director of the Institute of Metallurgy of the University of Kassel (Kassel, Germany)

The Journal was founded in 1997
Frequency of publication – monthly

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 Publishers:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074
Office D-119
e-mail: vestnik@istu.edu

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- | | |
|---|----|
| ❏ Балла О.М. Повышение эффективности фрезерования крупногабаритных деталей силового набора летательных аппаратов..... | 10 |
| ❏ Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Аналитический расчет основных параметров процесса правки маложестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами..... | 24 |
| ❏ Зыонг Ван Лонг, Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Мощность привода как параметр управления процессом зачистки поверхности лепестковым кругом..... | 35 |
| ❏ Осипов А.Г. Расчетно-теоретические и практические исследования универсальных пожарных стволов Осиповых..... | 44 |
| ❏ Стрижак А.Д., Липин А.А., Вишняков А.В. Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства, оснащенного роторно-винтовым движителем, по заболоченной местности..... | 55 |

Информатика, вычислительная техника и управление

- | | |
|---|-----|
| ❏ Аршинский В.Л., Аршинский Л.В., Доржсурэн Хишигсурэн. Методика экспертного оценивания качества функционирования производственно-экономических систем на основе знаниевых технологий..... | 63 |
| ❏ Гагарина Л.Г., Колдаев В.Д., Дорогов В.Г., Дорогова Е.Г., Слюсарь В.В. Эффективный алгоритм генерации случайных величин с кусочно-линейными плотностями распределения..... | 79 |
| ❏ Леонтьев С.В., Курзанов А.Д., Радыгин Р.В. Современные системы автоматизации предприятий по производству ячеистого бетона..... | 84 |
| ❏ Пыхалов А.А., Зыонг Ван Лам, Белозерцева О.П. Математическое моделирование для компьютерной обработки сканирования твердых деформируемых тел при построении и анализе их конечно-элементных моделей..... | 93 |
| ❏ Хапусов В.Г., Ермаков А.А., Подкорытов А.А. Идентификация технологического процесса выработки пара по каналам «температура в поворотной камере топочного устройства – качественные показатели процесса»..... | 112 |

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- **Васильев М.Ю.** Предельные издержки и характеристика предложения поставщика-ценополучателя для рынка на сутки вперед в электроэнергетике..... 122
- **Дмитриев А.В., Зинулов В.Э., Дмитриева О.С., Нгуен Ву Линь.** Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах..... 138
- **Колосок И.Н., Аксаева Е.С., Глазунова А.М.** Расчет максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях на основе методов оценивания состояния..... 145
- **Константинов Г.Г, Фам Конг Тао, Киселев В.И.** Техническое совершенствование автономного зарядно – разрядного электротехнического комплекса аккумуляторных батарей подводных аппаратов..... 154
- **Кудряшов А.Н., Байбулин Р.Р., Бибикина Ю.Д.** Оценка изменения точки росы в дымовых газах высокосернистых углей и их смесей..... 172
- **Марченко О.В., Соломин С.В.** Анализ эффективности аккумулирования электрической энергии и водорода в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии..... 183



Металлургия и материаловедение



- **Веселовский А.А.** Извлечение никеля и кобальта из лежалых и вновь образованных отвалных никелевых шлаков..... 194
- **Книжник А.В., Григорьев В.Г., Ключанцев А.Б., Тепикин С.В., Пьянкин А.П., Кузьмин М.П., Кузаков А.А., Шемет А.Д., Высотский Д.В.** Применение современных расчетных методов для оптимизации конструкции «сухой» газоочистной установки..... 209
- **Шепелев И.И., Жижаев А.М., Сахачев А.Ю., Алгебраистова Н.К.** Исследование твердофазных процессов при спекании известняково-нефелиновой шихты с техногенными добавками..... 220



Транспорт



- **Озорнин С.П., Тарасов И.А.** Методики и результаты оценки эффективности эксплуатации грузовых автотранспортных средств в условиях холодного климата..... 234
- **Устинов Р.И., Мельниченко О.В.** Моделирование аварийных процессов выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза при пропуске управляющих импульсов..... 244

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 3

2018

CONTENTS



Mechanical Engineering and Machine Science

- | | |
|--|----|
| Balla O.M. Improving milling efficiency of large-size parts of aircraft structural frame..... | 10 |
| Zaides S.A., Le Hong Kuang. Analytical calculation of the main parameters of small low rigid cylindrical parts straightening by transverse burnishing by flat plates..... | 24 |
| Duong Van Long, Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. Drive power as a control parameter of surface grinding by a flap wheel..... | 35 |
| Osipov A.G. Theoretical computation and practical studies of the Osipovs' multi-purpose fire nozzles..... | 44 |
| Strizhak A.D., Lipin A.A., Vishnyakov A.V. Research of straight-line motion of a transport-technological vehicle equipped with a rotary screw propeller on wetlands..... | 55 |



Information Science, Computer Engineering and Management

- | | |
|--|-----|
| Arshinsky V.L., Arshinsky L.V., Dorzhsuren Khishigsuren. Knowledge technology-based method of expert estimation of productive-economic system operation quality..... | 63 |
| Gagarina L.G., Koldaev V.D., Dorogov V.G., Dorogova E.G., Sliusar V.V. An effective generation algorithm of random variables with piecewise linear distribution den..... | 79 |
| Leontiev S.V., Kurzanov A.D., Radygin R.V. Modern automation systems for cellular concrete producing enterprises..... | 84 |
| Pykhalov A.A., Duong Van Lam, Belozertseva O.P. Mathematical modeling for computer processing of scans of deformable solids under construction and analysis of their finite element models..... | 93 |
| Khapusov V.G., Ermakov A.A., Podkorytov A.A. Identification of the technological process of steam production by the channels "temperature in the combustion unit rotary chamber – qualitative parameters of the process"..... | 112 |

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

CONTENTS



Power Engineering



- ▣ **Vasiliev M.Yu.** Marginal costs and a pricetaking producer supply function in a day-ahead market in electric power industry..... 122
- ▣ **Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S., Vu L. Nguyen.** Trapping of finely-divided solid particles from gas flows in rectangular separators..... 138
- ▣ **Kolosok I.N., Aksaeva E.S., Glazunova A.M.** State estimation method-based calculation of maximum permissible flows in monitored sections.... 145
- ▣ **Konstantinov G.G., Pham Cong Tao, Kiselev V.I.** Technical improvement of an autonomous charge-discharge electrotechnical complex of underwater device storage batteries..... 154
- ▣ **Kudryashov A.N., Baiburin R.R., Bibikova Yu.D.** Estimation of dew point change in the flue gases of high-sulfur coals and their mixtures..... 172
- ▣ **Marchenko O.V., Solomin S.V.** Analysis of electric energy and hydrogen accumulation efficiency in power systems with renewable energy sources..... 183



Metallurgy and Materials Science



- ▣ **Veselovsky A.A.** Nickel and cobalt recovery from aged and newly formed nickel dump slag..... 194
- ▣ **Knizhnik A.V., Grigoriev V.G., Klyuchantsev A.B., Tepikin S.V., Piyankin A.P., Kuzmin M.P., Kuzakov A.A., Shemet A.D., Vysotsky D.V.** Application of modern calculation methods to optimize a dry-type gas cleaning plant design..... 209
- ▣ **Shepelev I.I., Zhyzhaev A.M., Sakhachev A.Yu., Algebraistova N.K.** Study of solid phase processes under sintering of limestone-nepheline mixture with technogenous additives..... 220

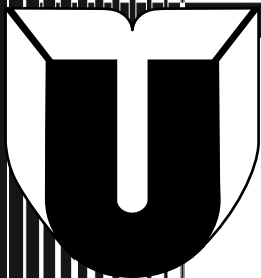


Transport



- ▣ **Ozornin S.P., Tarasov I.A.** Methods and results of cargo transport operation efficiency evaluation in cold climates..... 234
- ▣ **Melnichenko O.V., Ustinov R.I.** Modeling emergency processes of electric locomotive reversible converters under control pulse skip..... 244





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.

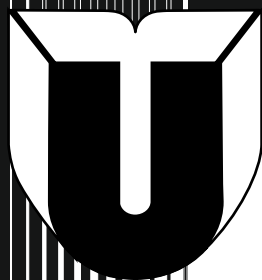
«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНИТИ РАН.

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Информатика, вычислительная техника и управление
- Энергетика
- Metallургия и материаловедение
- Транспорт

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.

The journal "Proceedings of Irkutsk State Technical University" is included in the international catalog of periodicals "UlrichsPeriodicals Directory", in the EBSCO database, in the scientific electronic library (eLIBRARY.RU). It is sent out to the Russian Book Chamber, All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) Database RAS.

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
- Information Science, Computer Engineering and Control
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science
- Transport

Editorial Board





Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9.01

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-10-23>

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФРЕЗЕРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИННЫХ ДЕТАЛЕЙ СИЛОВОГО НАБОРА ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

© О.М. Балла¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Повышение эффективности фрезерования крупногабаритных деталей типа панелей, балок, лонжеронов, шпангоутов из высокопрочных материалов на станках с программным управлением. **МЕТОДЫ.** В ходе работы были применены экспериментальные методы исследования интенсификации режимов фрезерования. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Исследованы режущие свойства современных инструментальных материалов отечественного производства для фрезерования высокопрочных нержавеющей сталей, титановых и алюминиевых сплавов. **ВЫВОДЫ.** Применение твердых сплавов марок ВП322 и ВРК15 в конструкциях специализированных и специальных фрез обеспечивает интенсификацию режимов фрезерования в 1,3–2,5 раза при обработке крупногабаритных деталей из титановых сплавов и высокопрочных нержавеющей сталей. Твердый сплав ВК8 обеспечивает интенсификацию съема металла при фрезеровании деталей из алюминиевых сплавов в 3–5 раз по сравнению с инструментом из быстрорежущих сталей.

Ключевые слова: твердые сплавы, фрезерование, титановые сплавы, высокопрочные нержавеющей стали, детали силового набора.

Информация о статье. Дата поступления 17 января 2018 г.; дата принятия к печати 20 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Балла О.М. Повышение эффективности фрезерования крупногабаритных деталей силового набора летательных аппаратов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 10–23. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-10-23

IMPROVING MILLING EFFICIENCY OF LARGE-SIZE PARTS OF AIRCRAFT STRUCTURAL FRAME

O.M. Balla

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., 664074, Irkutsk, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to improve the efficiency of milling of large-size parts of panel-, beam-, spar-, frame-type made of high-strength materials on CNC machine-tools. **METHODS.** The study employs experimental methods to study the issues of milling modes intensification. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The study has been given to the cutting properties of modern tool materials produced domestically for milling high-strength stainless steels, titanium and aluminium alloys. **CONCLUSIONS.** Application of hard alloys of brands ВП322 and ВРК15 in the designs of single-purpose and special cutters intensifies milling modes by 1.3–2.5 times when machining large-size parts from titanium alloys and high-strength stainless steels. Hard alloy ВК8 intensifies the removal of metal by 3-5 times as compared with the tool made of high-speed steel when milling parts from aluminium alloys.

Keywords: hard alloys, milling, titanium alloys, high-strength stainless steels, structural frame parts

Information about the article. Received January 17, 2018; accepted for publication February 26, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Balla O.M. Improving milling efficiency of large-size parts of aircraft structural frame. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 10–23. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-10-23

¹Балла Олег Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств Института авиационного машиностроения и транспорта, e-mail: ballaom@mail.ru
Oleg M. Balla, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-building Production of the Institute of Aircraft Engineering and Transport, e-mail: ballaom@mail.ru



Введение

На предприятиях отрасли новые инструментальные материалы находят ограниченное применение. Это связано с тем, что в справочной литературе практически отсутствует информация об их работоспособности. С учетом этого новые материалы используются на ранее применяемых режимах обработки. В результате такого подхода работоспособность новых инструментальных материалов определяется только по одному критерию – стойкости. В работах [1, 2] показано, что стойкость не является адекватной характеристикой работы инструмента. Для современных многоцелевых станков с высокой стоимостью часа работы наиболее важен такой показатель работоспособности, как коэффициент производительности. Следовательно, для решения вопросов снижения трудоемкости механической обработки необходимо комплексное исследование работоспособности инструментальных материалов. С учетом того, что заготовки крупногабаритных деталей из высокопрочных материалов характеризуются низкими коэффициентами использования материалов (КИМ) [3, 4], дополнительно приходится учитывать, что

черновое фрезерование выполняется с большой активной длиной режущих кромок, одновременно участвующих в резании. Это приводит к большим нагрузкам на технологическую систему и интенсивным вибрациям, приводящим к разрушению инструмента [5, 6]. Его работоспособность, как правило, обеспечивается снижением нагрузки на технологическую систему (особенно при черновом фрезеровании), что достигается путем удаления припуска на черновую обработку за несколько проходов, уменьшения толщин среза (подачи на зуб). Кроме того, при большой высоте конструктивных элементов деталей их обработку ведут по методу деления ширины фрезерования.

Все это вызывает снижение производительности механической обработки. С учетом вышесказанного исследование целесообразно было разделить на два этапа:

- изучение работоспособности инструментальных материалов применительно к обрабатываемым материалам;
- определение методов снижения динамических нагрузок на технологическую систему с сохранением или увеличением интенсивности съема металла.

Экспериментальное определение эффективности инструментальных материалов при фрезеровании

Для выполнения экспериментальных работ были выбраны наиболее широко применяемые в конструкциях силового набора планеров конструкционные материалы и инструментальные материалы, редко применяемые на предприятиях. Для сравнения были использованы широко применяемые инструментальные материалы. Физико-механические свойства исследуемых материалов приведены в табл. 1 [7].

Физико-механические характеристики инструментальных материалов приведены в табл. 2² [8, 9].

Экспериментальные работы выполнены на специализированном фрезерном станке модели ФП17МН с числовым программным управлением (ЧПУ) при обработке заготовок из материалов, приведенных в табл. 1. Данные материалы находят широкое применение в конструкции силового набора летательных аппаратов. Привод главного движения станка обеспечивает обработку исследуемых материалов с крутящим моментом 1200 Нм в режиме ПВ100%.

²Балла О.М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология: учебное пособие. СПб.: Лань, 2015. 368 с. / Balla O.M. Machining of parts on CNC machine-tools. Equipment. Tooling. Technology: Learning aids. St. Petersburg: Lan Publ., 2015, 368 p.



Таблица 1

Физико-механические свойства титановых сплавов и высокопрочных сталей

Table 1

Physical and mechanical properties of titanium alloys and high-strength steels

Марка материала / Brand of material	Предел прочности на изгиб, МПа / Flexural strength, MPa	Относительное удлинение, % / Percentage of elongation, %	Модуль упругости, МПа / Modulus of elasticity, MPa
BT20	1000–1100	6–12	115000
BT22	1200	8–12	115000
08X15H5Д2Т (ВНЧ2)	1350*	12	220000
12X15H4AM3 (ВНЧ5)	1390–1650*	15	220000
B95ПЧ	540	6–8	75000
1933	510	–	75000

*Предел прочности на изгиб приведен после старения, при фрезеровании он находится в пределах 1000–1100 МПа / The flexural strength is given after aging, when milling it has been in the range of 1000–1100 MPa.

Таблица 2

Физико-механические характеристики инструментальных материалов

Table 2

Physico-mechanical characteristics of tool materials

Марки твердого сплава и быстрорежущих сталей / Brands of hard alloys and high-speed steels	Предел прочности на изгиб, МПа / Flexural strength, MPa	Твердость, HRA (HRC) / Hardness HRA (HRC)
BK8	1600	87,5
BK6OM	1270	90,5
BK10XOM	1500–1700	89
BK15XOM	1600–1800	88
BPK15	2000	90
ВП322	1800	91
P18	2900–3000	(63–65)
P9K5	2500–2700	(64–67)
P9M4K8	2500–2800	(65–68)

В качестве инструмента применяли:

– специальные торцовые фрезы с механическим креплением пластин твердого сплава формы 03133-120312 по ГОСТ 19050 и 2008-1108 по ТУ 49-1963-73 со следующими геометрическими параметрами для титановых сплавов и высокопрочных нержавеющей сталей: $\varphi = 80^\circ$; $\gamma = 3^\circ$; $\alpha = 8^\circ$; $\lambda = 5^\circ$;

– концевые фрезы с напайными пластинками твердого сплава формы 36 со следующими геометрическими параметрами: $\omega = 40^\circ$; $\gamma = 5^\circ$, $\alpha = 18^\circ$ – для обработки титановых сплавов и высокопрочных нержавеющей сталей; $\omega = 40^\circ$; $\gamma = 15^\circ$,

$\alpha = 20^\circ$ – для алюминиевых сплавов;

– концевые фрезы из быстрорежущих сталей для обработки алюминиевых сплавов со следующими геометрическими параметрами: $\omega = 40^\circ$; $\gamma = 15^\circ$; $\alpha = 20^\circ$.

Фаску износа измеряли на инструментальном микроскопе ММИ-2 с точностью до 0,005 мм. Измерения выполняли на рабочем месте без извлечения фрезы из оправки. Для обеспечения фиксированного положения фрезы устанавливали на ложемент. Измерение выполняли в отраженном свете. Неперетачиваемые пластинки для измерения износа устанавливались на ложементе, выполненном из материала Ком-



пар-С, что обеспечивало их точную ориентацию. Точная ориентация концевых фрез и пластин исключает при измерении поднастройку резкости. Это способствует повышению точности измерения износа по задней поверхности. Экспериментальные ра-

боты были выполнены по методике, представленной в работах [10, 11]. Условия выполнения экспериментальных работ при фрезеровании титановых сплавов и полученные результаты приведены на рис. 1, 2.

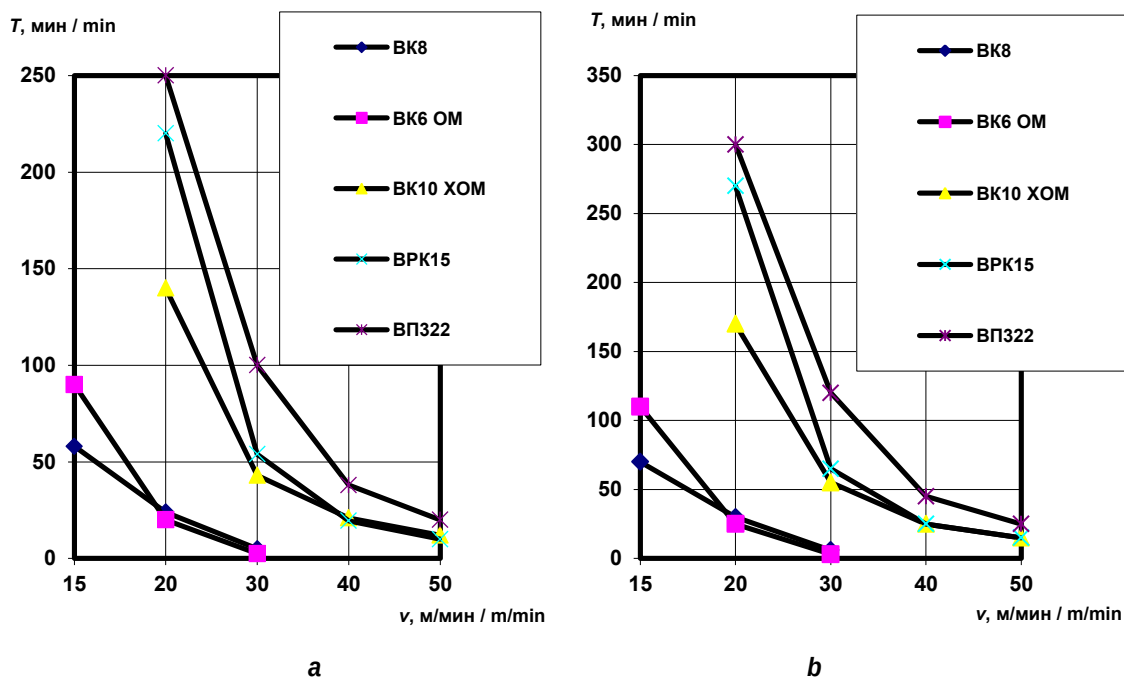


Рис. 1. Влияние скорости резания V на стойкость T при торцовом фрезеровании титановых сплавов BT22 (a) и BT20 (b)

Fig. 1. Influence of cutting speed V on durability T at face milling of titanium alloys BT22 (a) and BT20 (b)

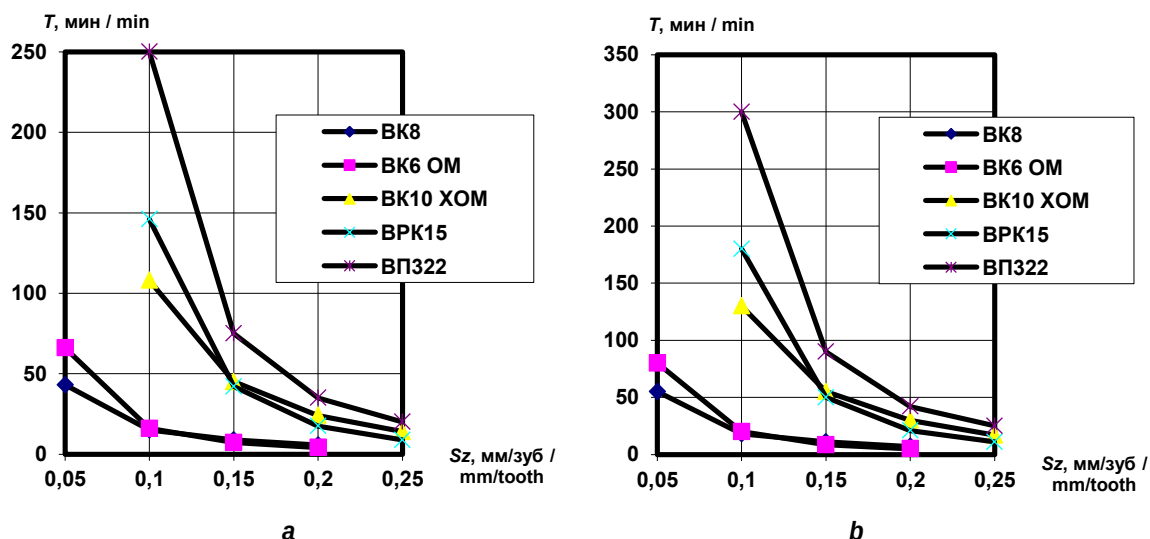


Рис. 2. Влияние подачи на зуб s_z на стойкость T при торцовом фрезеровании титановых сплавов BT22 (a) и BT20 (b)

Fig. 2. Influence of advance per tooth s_z on durability T at face milling of titanium alloys BT22 (a) and BT20 (b)



Исследование зависимости стойкости от скорости резания было выполнено при следующих условиях: титановые сплавы – BT20, BT22; торцовая фреза $d = 80$ мм; подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб; глубина фрезерования $t = 2$ мм; ширина фрезерования $B = 50$ мм; охлаждение – РЗ СОЖ8; фрезерование – попутное.

Условия исследования зависимости стойкости от подачи на зуб были выполнены при тех же условиях при постоянной скорости резания $V = 22$ м/мин.

Анализ полученных результатов фрезерования титановых сплавов позволил установить, что перечень сплавов необоснованно ограничен марками ВК8 и ВК6 ОМ. Применение относительно новых марок твердых сплавов, таких как ВП322, ВРК15, ВК10 ХОМ, позволяет значительно повысить как скорость резания, так и подачу на зуб. На рис. 1, 2 марки твердых сплавов приведены в порядке снижения их стойкости.

Наиболее эффективен твердый сплав ВП322. Его применение обеспечивает интенсификацию режимов чернового фрезерования не менее чем в 2 раза только за счет увеличения скорости резания при одновременном увеличении стойкости. Увеличение подачи на зуб также возможно до 2 раз, но это целесообразно использовать только в условиях высокой жесткости технологической системы.

Исследование работоспособности твердых сплавов при концевом фрезеровании титановых сплавов приведено на рис. 3, 4.

Исследование зависимости стойкости от скорости резания были выполнены при следующих условиях: концевая фреза $d = 50$ мм; подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб; глубина фрезерования $t = 10$ мм; ширина фрезерования $B = 80$ мм; число зубьев $z = 4$; охлаждение – РЗ СОЖ8; фрезерование – попутное.

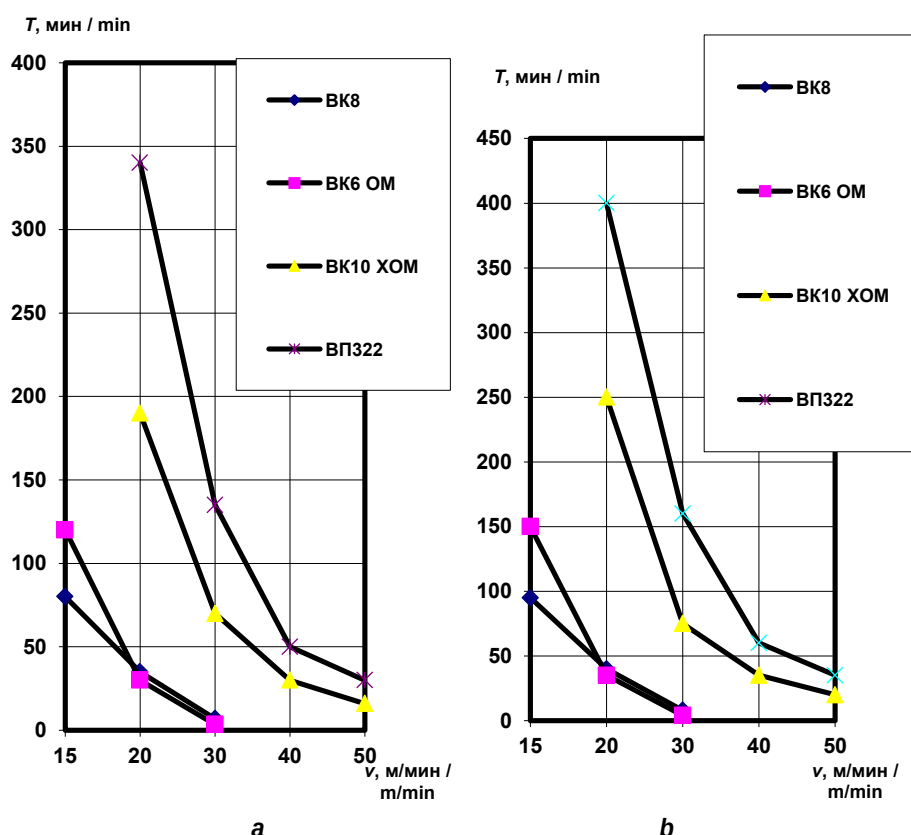


Рис. 3. Влияние скорости резания V на стойкость T при концевом фрезеровании титановых сплавов BT22 (a) и BT20 (b)

Fig. 3. Influence of cutting speed V on durability T at end milling of titanium alloys BT22 (a) and BT20 (b)

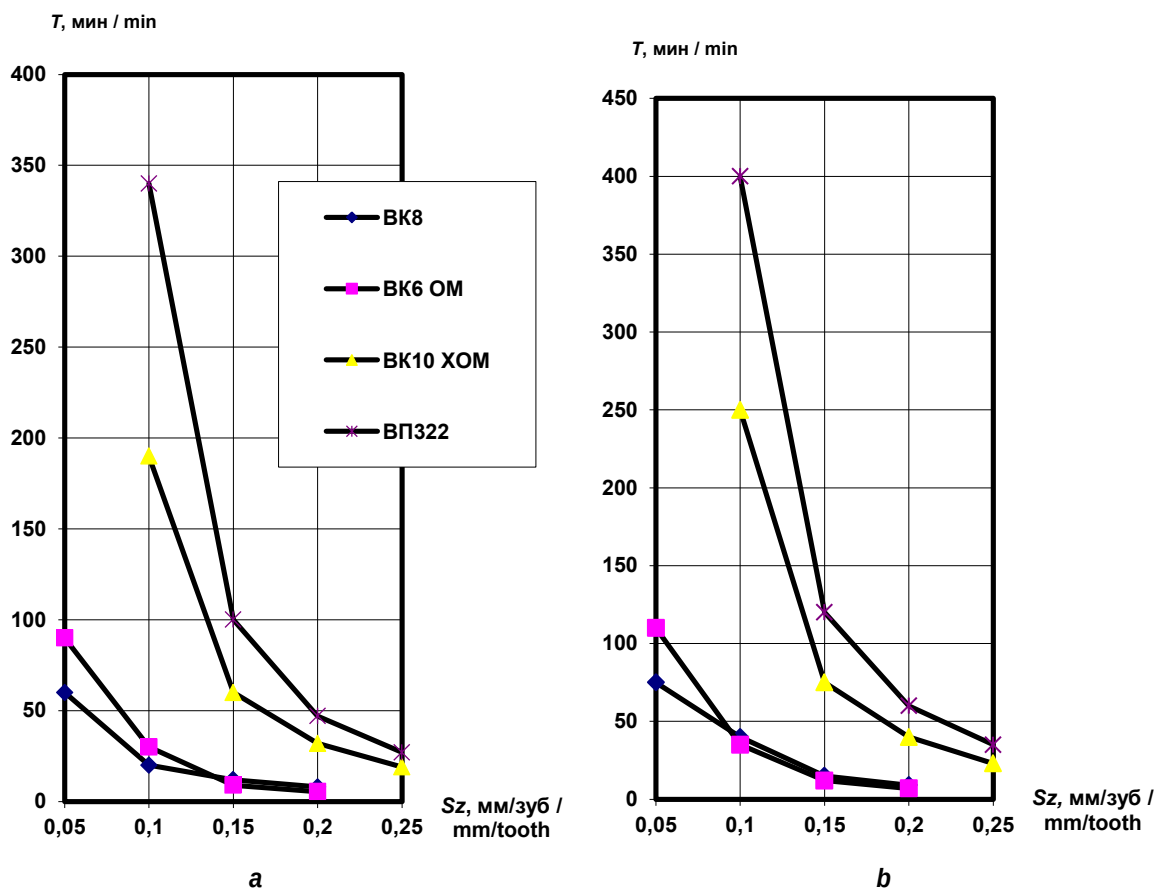


Рис. 4. Влияние подачи на зуб s_z на стойкость T при торцовом фрезеровании титановых сплавов BT22 (a) и BT20 (b)

Fig. 4. Influence of advance per tooth s_z on durability T at face milling of titanium alloys BT22 (a) and BT20 (b)

Условия исследования зависимости стойкости от подачи на зуб были выполнены при тех же условиях при постоянной скорости резания $V = 20$ м/мин.

Анализ полученных результатов при фрезеровании титановых сплавов позволил установить, что применение относительно новых марок твердых сплавов, таких как ВП322, ВРК15, ВК10 ХОМ, позволяет значительно повысить как скорость резания, так и подачу на зуб. Марки твердых сплавов приведены в порядке снижения эффективности. Наиболее эффективен твердый сплав ВП322. Его применение обеспечивает интенсификацию режимов чернового фрезерования не менее чем в 2 раза только за счет увеличения скорости резания при одновременном увеличении

стойкости. Увеличение подачи на зуб также возможно более чем в 2 раза, но это целесообразно только в условиях высокой жесткости технологической системы.

Условия выполнения экспериментальных работ при фрезеровании высокопрочных нержавеющей сталей и полученные результаты приведены на рис. 5, 6.

Исследование зависимости стойкости от скорости резания было выполнено при следующих условиях: стали: ВНС2, $\sigma_s = 1000$ МПа; ВНС5, $\sigma_s = 1200$ МПа; фреза концевая $d = 50$ мм; подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб; глубина фрезерования $t = 10$ мм; ширина фрезерования $B = 80$ мм; число зубьев $z = 4$; охлаждение – РЗ СОЖ8; фрезерование – попутное.

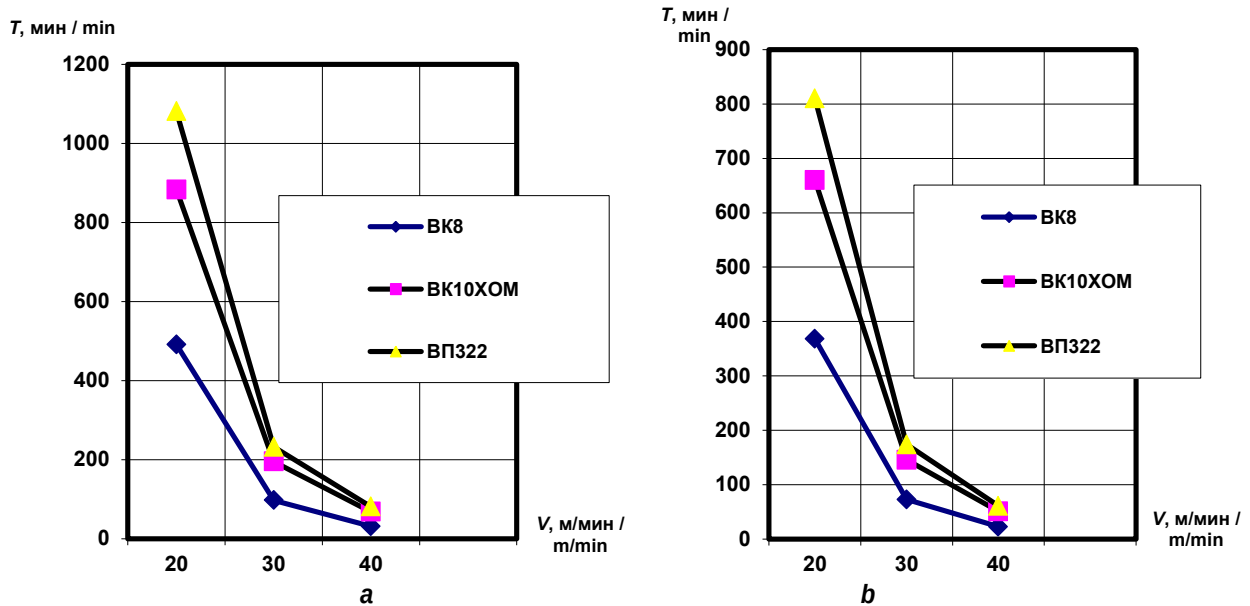


Рис. 5. Влияние скорости резания V на стойкость T при концевом фрезеровании сталей ВНС2 (08X15H5D2T) (a) и ВНС5 (13X15H4AM3) (b)

Fig. 5. Influence of cutting speed V on durability T at end milling of steels ВНС2 (08X15H5D2T) (a) and ВНС5 (13X15H4AM3) (b)

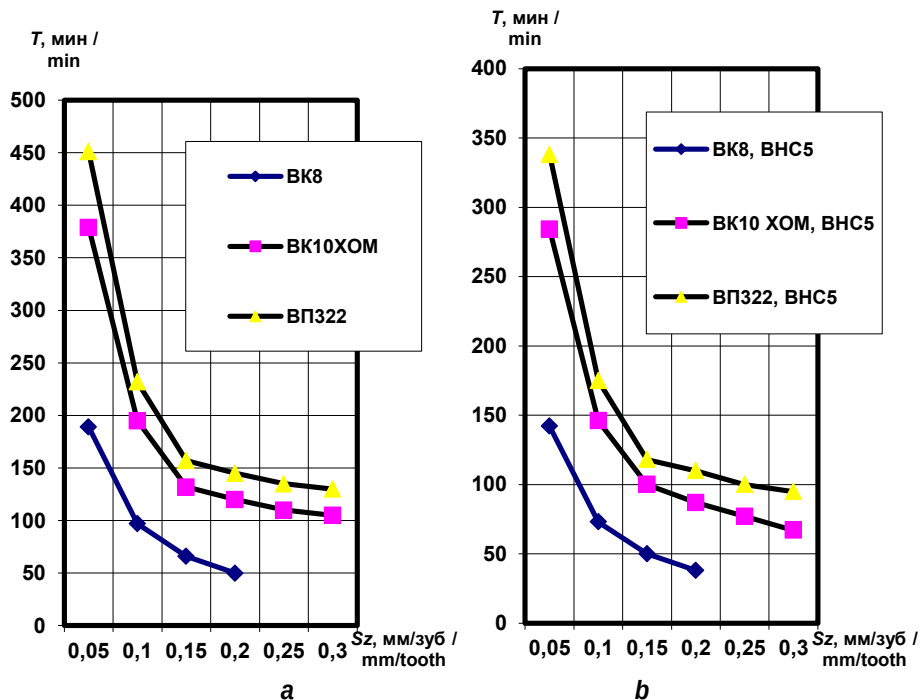


Рис. 6. Влияние подачи на зуб s_z на стойкость T при концевом фрезеровании сталей ВНС2 (08X15H5D2T) (a) и ВНС5 (13X15H4AM3) (b)

Fig. 6. Influence of advance per tooth s_z on durability T at end milling of steels ВНС2 (08X15H5D2T) (a) and ВНС5 (13X15H4AM3) (b)

Условия исследования зависимости стойкости от подачи на зуб были выполнены при тех же условиях при постоянной скорости резания $V = 30$ м/мин.

Анализ полученных результатов при

фрезеровании высокопрочных нержавеющей сталей также подтвердил необходимость применяемых марок твердых сплавов, таких как ВП322, BK10 XOM. Это позволяет значительно повысить как скорость



резания, так и подачу на зуб. Марки твердых сплавов приведены в порядке снижения эффективности. Наиболее эффективен твердый сплав ВП322. Его применение обеспечивает интенсификацию режимов чернового фрезерования не менее чем в 1,5 раза только путем увеличения скорости резания при одновременном увеличении стойкости. Работоспособность твердого сплава ВК10 ХОМ несколько ниже. При

фрезеровании сталей типа ВНС наиболее эффективно увеличение подачи на зуб. Технологически это возможно до трех раз, но это только в условиях высокой жесткости технологической системы.

Условия выполнения экспериментальных работ при фрезеровании алюминиевых сплавов и полученные результаты приведены на рис. 7, 8.

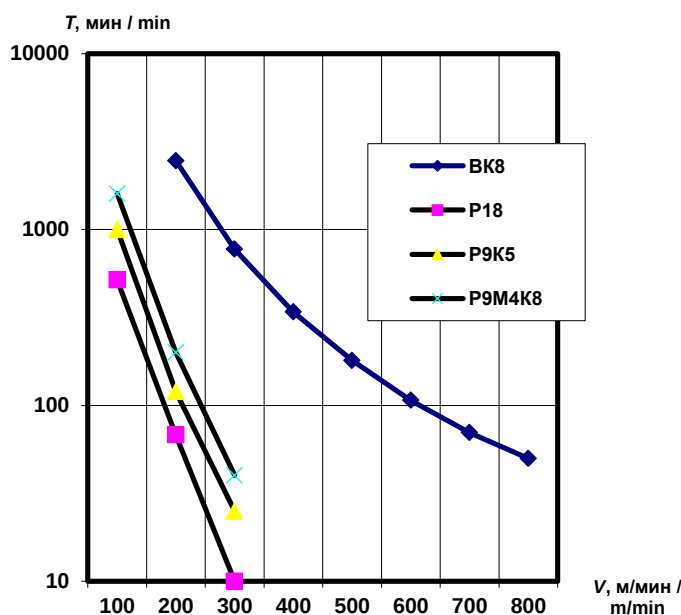


Рис. 7. Влияние скорости резания V на стойкость T при концевом фрезеровании алюминиевых сплавов В95ПЧ и 1933

Fig. 7. Influence of cutting speed V on durability T at end milling of aluminium alloys В95ПЧ and 1933

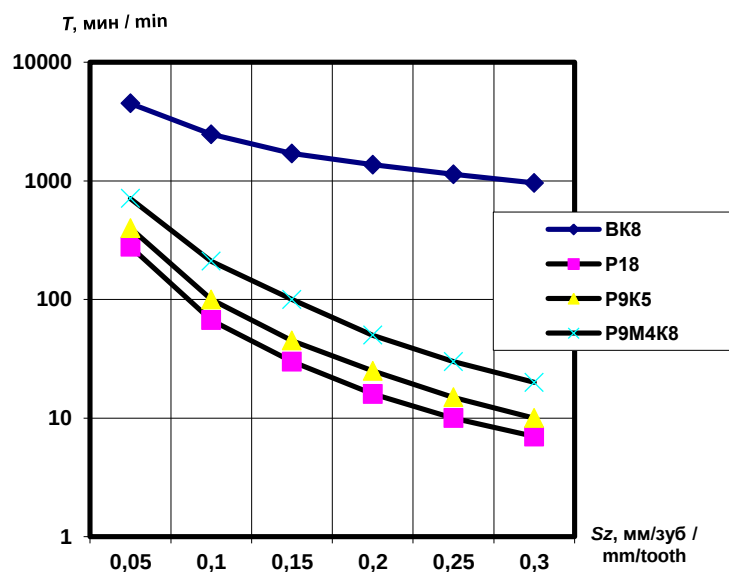


Рис. 8. Влияние подачи на зуб s_z на стойкость при концевом фрезеровании алюминиевых сплавов В95ПЧ и 1933

Fig. 8. Influence of advance per tooth s_z on durability at end milling of aluminium alloys В95ПЧ and 1933



Исследование зависимости стойкости от скорости резания были выполнены при следующих условиях: фрезы концевые $d = 50$ мм; подача на зуб $S_z = 0,1$ мм/зуб; глубина фрезерования $t = 10$ мм; ширина фрезерования $B = 50$ мм; число зубьев $z = 3$; охлаждение – РЗ СОЖ8; фрезерование – попутное.

Условия исследования зависимости стойкости от подачи на зуб были выполнены при тех же условиях при постоянной скорости резания $V = 200$ м/мин. Выбор скорости резания 200 м/мин был обусловлен тем, что при данной скорости фрезы из быстрорежущих сталей еще сохраняют работоспособность, а на твердосплавных пластинах прекращается наростообразование. Наростообразование на твердосплавных фрезах проявляется не так, как на резцах, и при продолжительной работе приводит к пакетированию стружки в стружечных канавках фрез даже при числе зубьев, равном двум, и дальнейшему их разрушению. Автором установлено, что при фрезеровании алюминиевых сплавов, упрочняемых термообработкой, образование нароста исключается при скоростях резания более 170–180 м/мин. Разграничение областей

рационального применения фрез из быстрорежущих сталей и твердого сплава по частоте вращения шпинделя приведено на рис. 9.

Разграничение определяет рациональные области применения фрез из условия исключения наростообразования для твердосплавного инструмента. Ниже линии разграничения необходимо выполнять обработку алюминиевых сплавов, упрочняемых термообработкой, фрезами из быстрорежущих сталей независимо от частоты вращения шпинделя. Предпочтение следует отдавать инструменту из сталей с повышенным содержанием кобальта [12].

Анализ полученных результатов при фрезеровании высокопрочных алюминиевых сплавов позволил установить, что даже твердый сплав ВК8 обеспечивает значительную интенсификации режимов фрезерования по сравнению с инструментом из быстрорежущих сталей. Его применение даже относительно легированных быстрорежущих сталей позволяет увеличить скорость резания в 2–3 раза, и при достаточной жесткости технологической системы возможно повышение подачи на зуб.

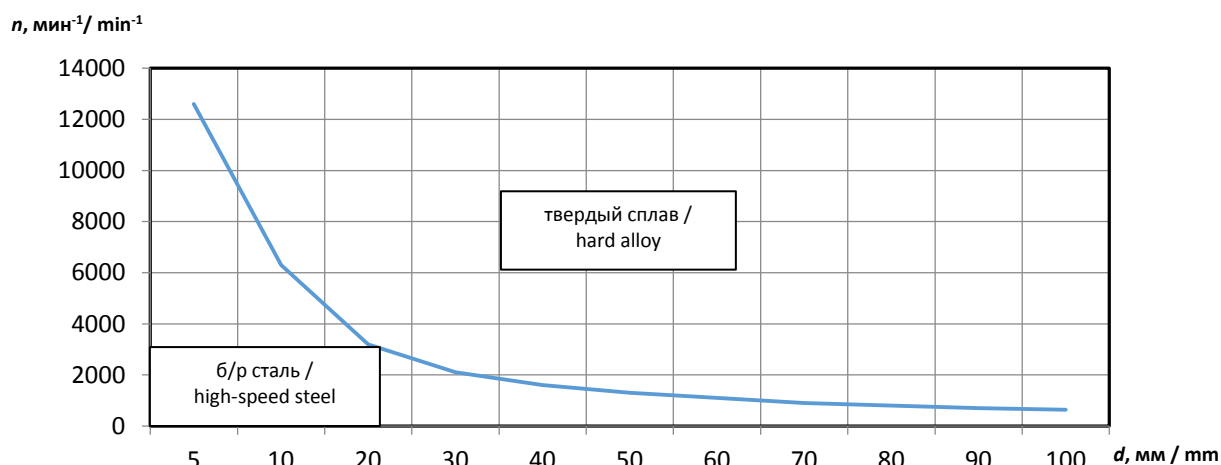


Рис. 9. Линия разграничения областей рационального применения фрез из твердого сплава и быстрорежущих сталей

Fig. 9. Differentiation line of the fields of rational application of mills from rigid alloys and high-speed steels



Следует заметить, что возможность интенсификации режимов чернового фрезерования ограничена технологическими характеристиками оборудования, а именно, жесткостью, крутящим моментом и мощно-

стью привода главного движения. С учетом этого особую актуальность приобретают вопросы снижения динамических нагрузок на технологическую систему без снижения режимов фрезерования.

Экспериментальное определение снижения динамических нагрузок на технологическую систему при фрезеровании

Рассматриваемые в статье обрабатываемые материалы имеют высокое упругое последствие. С учетом этого фрезы должны иметь большие значения задних углов [11]. Это исключает эффективное применение фрез с переменной схемой резания, полученной профильным затылованием. С учетом этого была разработана и исследована схема получения острозаточенного периодического профиля режущих кромок, обеспечивающего получение больших значений задних углов как на основных режущих кромках, так и вспомогательных [13, 14] (рис. 10, 11).

На рис. 10 приняты следующие обозначения: $\beta_{\text{прав}}(\text{лев})$ – углы подъема вспомогательных винтовых поверхностей соответственно правого и левого направлений;

ω – угол наклона винтовой линии зуба фрезы; $H_{\text{пр}}, H_{\text{лев}}$ – шаги вспомогательных винтовых поверхностей соответственно правого и левого направлений.

На рис. 11 приняты следующие обозначения: $\varphi_{\text{пр(лев)}}$ – вспомогательные углы в плане соответственно на правой и левой сторонах стружкоразделительной канавки; $\alpha_{\text{пр(лев)}}$ – задние углы на вспомогательных режущих кромках; t_k – глубина стружкоразделительной канавки; b – активная длина режущей кромки; b_1 – ширина стружкоразделительной канавки.

Эффективность черновой обработки фрезами с острозаточенным периодическим профилем режущих кромок приведена на рис. 12–14.

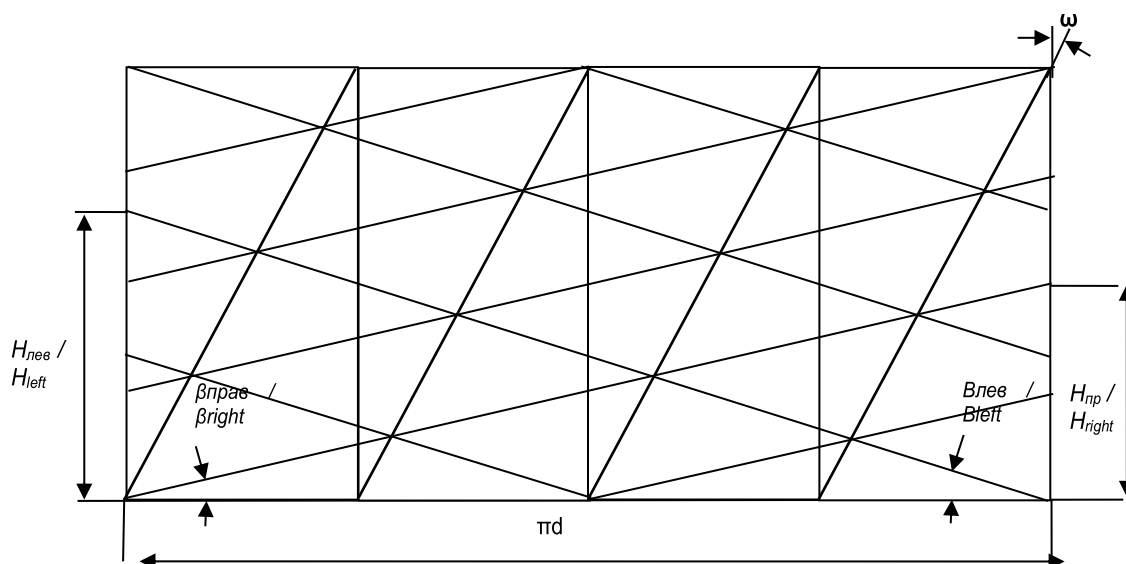


Рис. 10. Схема образования переменной схемы резания на острозаточенных фрезях вспомогательными винтовыми поверхностями правого и левого направлений
Fig. 10. Diagram of variable cutting pattern formation on the sharp mills by auxiliary helical surfaces of right-hand and left-hand directions

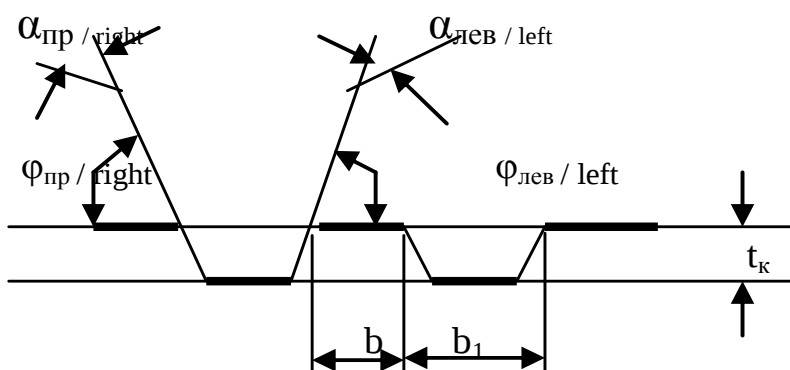


Рис. 11. Профиль режущих кромок, образованный пересечением основной режущей кромки вспомогательными винтовыми поверхностями
Fig. 11. Profile of cutting edges formed by the section of the main cutting edge by auxiliary helical surfaces

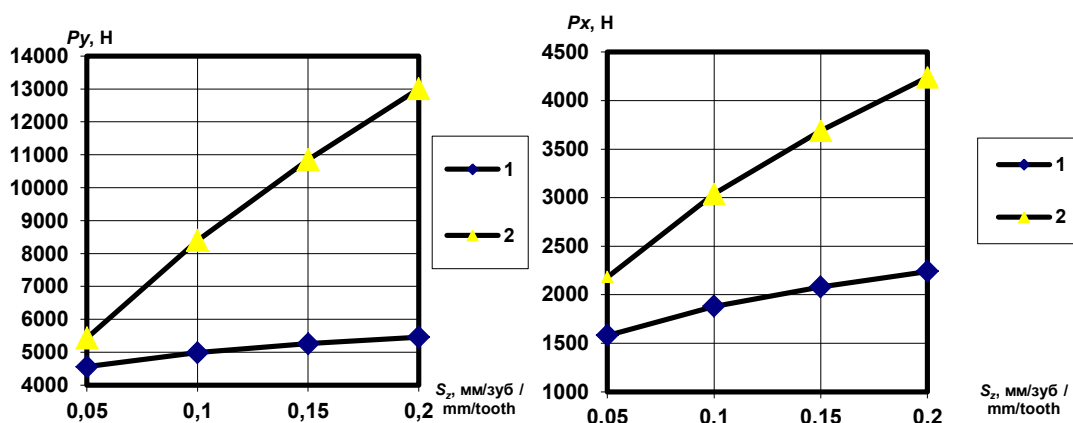


Рис. 12. Влияние конструкций концевых фрез на силы резания P_y и P_x при изменении подачи на зуб s_z
Fig. 12. Influence of end milling cutter designs on the cutting forces P_y and P_x under the variation of the advance per tooth s_z

На рис. 12 приняты следующие обозначения: 1 – концевая фреза с периодическим профилем режущих кромок (переменной схемой резания); 2 – эталонная концевая фреза; обрабатываемый материал –

ВТ20, диаметр фрезы $d = 50$ мм, число зубьев $z = 4$, материал режущей части ВК8, глубина фрезерования $t = 10$ мм, ширина фрезерования $B = 60$ мм.

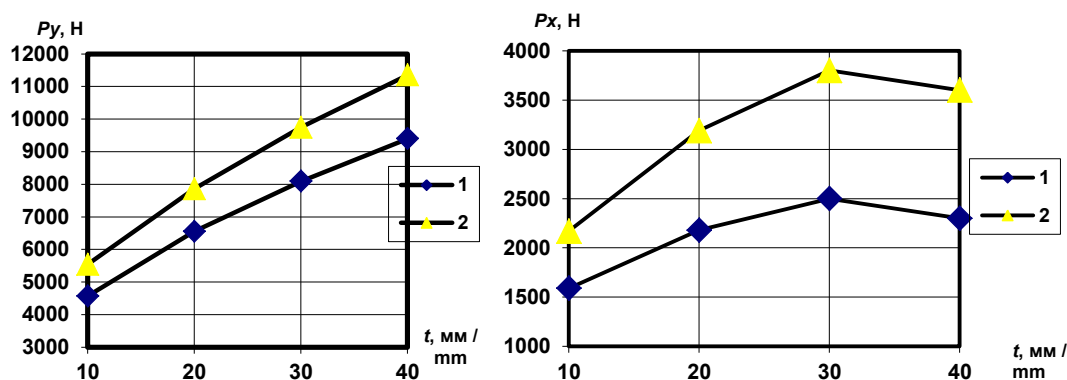


Рис. 13. Влияние конструкций концевых фрез силы резания P_y и P_x при изменении глубины фрезерования t
Fig. 13. Influence of end milling cutter designs on the cutting forces P_y and P_x under the variation of the milling depth t



На рис. 13 приняты следующие обозначения: 1 – концевая фреза с периодическим профилем режущих кромок (переменной схемой резания); 2 – эталонная концевая фреза; обрабатываемый материал – ВТ20, диаметр фрезы $d = 50$ мм, число зубьев $z = 4$, материал режущей части – ВК8, подача на зуб $s_z = 0,1$ мм/зуб; ширина фрезерования $B = 60$ мм.

На рис. 14 приняты следующие обозначения: 1 – концевая фреза с периодическим профилем режущих кромок (переменной схемой резания); 2 – эталонная концевая фреза; обрабатываемый материал – ВТ20, диаметр фрезы $d = 50$ мм, число зубьев $z = 4$, материал режущей части – ВК8, подача на зуб $s_z = 0,1$ мм/зуб; глубина

фрезерования $t = 60$ мм.

Полученные результаты показали, что применение переменных схем резания обеспечивает при равных условиях эксплуатации снижение составляющих сил резания от 1,3 до 2 раз, при этом эффект от их применения возрастает с увеличением толщины среза, глубины и ширины фрезерования. Это в свою очередь обеспечивает возможность увеличения минутной подачи фрезы на 30–40% при одновременном увеличении стойкости. Выполненные производственные испытания подтвердили полученные результаты (табл. 3, 4, где D – диаметр фрезы; L – длина рабочей части фрезы; R – радиус заточки торцевой части фрезы; z – число зубьев фрезы).

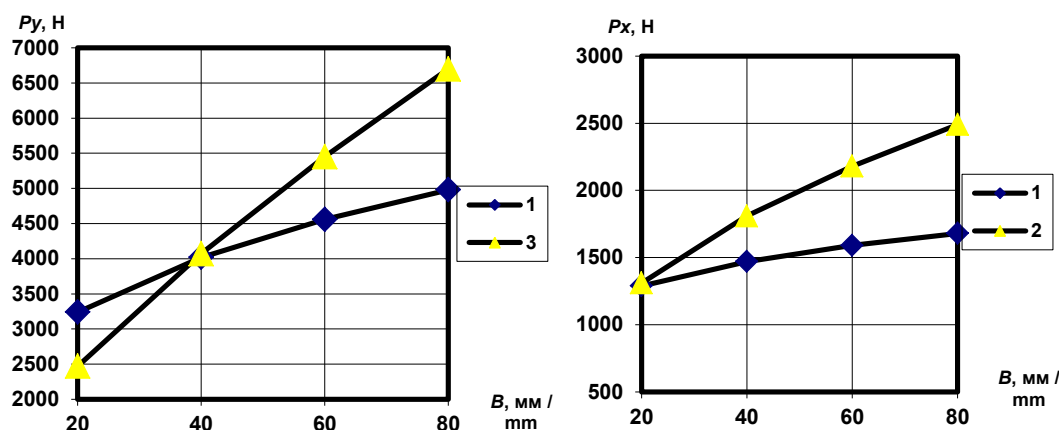


Рис. 14. Влияние конструкций концевых фрез силы резания P_y и P_x при изменении ширины фрезерования

Fig. 14. Influence of end milling cutter designs on the cutting forces P_y and P_x under the variation of the milling width

Результаты производственных испытаний фрез с переменной схемой резания при фрезеровании стали 08X15H5Д2Т

Таблица 3

Table 3

Production test results of cutters with variable cutting scheme when milling steel 08X15H5Д2Т

Деталь / Part	Фреза / Cutter: $D \times L \times R \times z$	Режим фрезерования: $V, \text{ м/мин}; S, \text{ мм/мин}; t, \text{ мм}$ / Milling mode: $V, \text{ m/min}; S, \text{ mm/min}; t, \text{ mm}$	Стойкость, мин / Durability, min
xxxx.xxx.x1	$45 \times 50 \times 4 \times 5$	17,5; 80; 40*	540
xxxx.xxx.x2	$40 \times 75 \times 4 \times 4$	22,4; 80; 10–15	450
xxxx.xxx.x1	$45 \times 50 \times 4 \times 5$	17,5; 80; 40*	540**
xxxx.xxx.x2	$40 \times 75 \times 4 \times 4$	22,4; 80; 10–15	450**

*Работа фрезы с припуском 40 мм (в заводской программе фреза удаляет припуск 20 мм) / Operation of the cutter with the allowance of 40 mm (according to the factory program the cutter removes the allowance of 20 mm);

**работа фрезы после переточки / Cutter operation after resharpening.



Таблица 4

Результаты испытаний контрольной партии фрез, применяемых на предприятии

Table 4

Results of testing the control lot of cutters used at the enterprise

Деталь / Part	Фреза / Cutter: $D \times L \times R \times z$	Режим фрезерования: V , м/мин; S , мм/мин; t , мм / Milling mode: V , m/min; S , mm/min; t , mm	Стойкость, мин / Durability, min
xxxx.xxx.x1	45 × 50 × 4 × 4	17,5; 60; 20	180
xxxx.xxx.x2	40 × 75 × 4 × 4	22,4; 60; 10–15	90
xxxx.xxx.x1	45 × 50 × 4 × 5	17,5; 60; 20	180**
xxxx.xxx.x2	40 × 75 × 4 × 4	22,4; 60; 10–15	90**

**Работа фрезы после переточки / Cutter operation after resharping.

Аналогичные результаты были получены и при черновом фрезеровании

крупногабаритных заготовок из титановых сплавов [14].

Заключение

Применение твердых сплавов марок ВП322, ВК10 ХОМ и ВРК15 в конструкциях специализированных и специальных фрез обеспечивает интенсификацию режимов фрезерования в 1,3–2,5 раза при обработке крупногабаритных деталей из титановых сплавов и высокопрочных нержавеющей сталей. При концевом фрезеровании твердый сплав ВРК15 не испытывался ввиду того, что винтовые пластины из данной марки не выпускаются. Твердый сплав ВК8 обеспечивает интенсификацию съема ме-

талла при фрезеровании деталей из алюминиевых сплавов по сравнению с инструментом из быстрорежущих сталей в 3–5 раз. Применение переменных схем резания обеспечивает снижение динамических нагрузок на технологическую систему, что дает возможность дополнительно интенсифицировать съем металла за счет увеличения минутной подачи, увеличенного припуска срезаемого металла за один проход при одновременном увеличении стойкости.

Библиографический список

1. Балла О.М. Инженерная оценка качества режущего инструмента // Авиационная промышленность. 1989. № 4. С. 48–49.
2. Балла О.М. Основные направления развития конструкций инструмента // Вестник ИрГТУ. 2006. № 4-3 (28). С. 40–43.
3. Белянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. М.: Машиностроение, 1979. 360 с.
4. Белянин П.Н. Технология и оборудование для производства широкофюзеляжных самолетов в США. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
5. Жарков И.Г. Вибрации при обработке лезвийным инструментом. Л.: Машиностроение, 1986. 186 с.
6. Жарков И.Г. Управление интенсивностью автоколебаний – важный резерв повышения производительности и качества изделий // Исследование обрабатываемости жаропрочных и титановых сплавов: межвузовский сб. Куйбышев: Изд-во Куйбышев. авиац. ин-та им. С.П. Королева. 1976. Вып. 4.

- С. 99–105.
7. Авиационные материалы. Справочник: в 7 т. / под ред. К.Н. Туманова. М.: Машиностроение, 1972. Т. 2 – 400 с.; т. 5 – 200 с.
8. Зубарев Ю.М. Современные инструментальные материалы. СПб: Лань, 2008. 224 с.
9. Балла О.М. Инструментообеспечение современных станков с ЧПУ. СПб.: Лань, 2017. 200 с.
10. Кондратов А.С. Методика экспериментального установления режимов скоростного точения в производственных условиях // Вестник машиностроения. 1963. № 4. С. 59–60.
11. Балла О.М. Исследование режущих свойств инструментальных материалов и работоспособности конструкций инструмента // Вестник ИрГТУ. 2016. № 6. С. 10–25. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-10-25>
12. Шлур Г., Штеферле Т. Справочник по технологии резания материалов: в 2 кн. / пер. с нем.; под ред.



Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 1985. Кн. 1 – 616 с.; кн. 2 – 688 с.

13. Балла О.М. Повышение эффективности фрезерования деталей из титановых сплавов // Авиацион-

ная промышленность. 1989. № 11. С. 44–46.

14. А.с. № 1050176 МКИ В23с 5/06. Фреза / О.М. Балла. 1983.

References

1. Balla O.M. Engineering evaluation of cutting tool quality. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation industry]. 1989, no. 4, pp. 48–49. (In Russian).
2. Balla O.M. Main directions of tool design development. *Vestnik IrGTU*. [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2006, no. 4-3 (28), pp. 40–43. (In Russian).
3. Belyanin P.N. *Proizvodstvo shirokofyuzelyazhnykh samoletov* [Production of wide-body aircrafts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979, 360 p. (In Russian).
4. Belyanin P.N. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva shirokofyuzelyazhnykh samoletov v SShA* [Technology and equipment for the production of wide-body aircrafts in the United States]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979, 255 p. (In Russian).
5. Zharkov I.G. *Vibratsii pri obrabotke lezviinym instrumentom* [Vibrations under machining by an edge tool]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1986, 186 p. (In Russian).
6. Zharkov I.G. *Upravlenie intensivnost'yu avtokolebaniy – vazhnyi rezerv povysheniya proizvoditel'nosti i kachestva izdelii* [Control of self-oscillations intensity as an important reserve for increasing efficiency and product quality]. *Mezhvuzovskii sbornik "Issledovanie obrabatyvaemosti zharoprochnykh i titanovykh splavov"* [Interuniversity collection of articles "Study of heat-resistant and titanium alloys machinability"]. Kuibyshev: Kuibyshevskii aviatsionnyi institut im. S.P. Koroleva Publ., 1976, issue 4, pp. 99–105. (In Russian).
7. *Aviatsionnye materialy. Spravochnik* [Aviation materials. Handbook]. V 7 t. / pod. red. K.N. Tumanova [In 7 volumes. Under edition of K.N. Tumanov]. Moscow:

Mashinostroenie Publ., 1972, vol. 2 – 400 p.; vol. 5 – 200 p. (In Russian).

8. Zubarev Yu.M. *Sovremennye instrumental'nye materialy* [Modern instrumental materials]. Sankt-Peterburg: Lan' Publ., 2008, 224 p. (In Russian).

9. Balla O.M. *Instrumentoobespechenie sovremennykh stankov s ChPU* [Tooling for modern CNC machine tools]. Sankt-Peterburg: Lan' Publ., 2017, 200 p. (In Russian).

10. Kondratov A.S. Methods of experimental setting of high-speed turning modes in production conditions. *Vestnik mashinostroeniya* [Bulletin of Mechanical Engineering]. 1963, no. 4, pp. 59–60. (In Russian).

11. Balla O.M. Research of tool material cutting properties and tool design performance capacity. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 6, pp. 10–25. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-6-10-25>

12. Shpur G., Shteflerle T. *Spravochnik po tekhnologii rezaniya materialov* [Reference book on the technology of cutting materials]. V 2 kn. / per. s nem.; pod red. Yu.M. Solomentseva [In 2 books /translation from German; under edition of Yu.M. Solomentsev]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1985, book 1 – 616 p.; book 2 – 688 p.

13. Balla O.M. Improving efficiency of milling titanium alloy parts. *Aviatsionnaya promyshlennost'* [Aviation industry]. 1989, no. 11, pp. 44–46. (In Russian).

14. Balla O.M. *Freza* [The cutter]. A.s. [Certificate of authorship of the Soviet Union] no. 1050176 MKI V23s 5/06, 1983.

Критерии авторства

Балла О.М. провел исследования, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Balla O.M. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interest

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.787.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-24-34>

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПРАВКИ МАЛОЖЕСТКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКОЙ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ

© С.А. Зайдес¹, Лэ Хонг Куанг²

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Определить основные параметры процесса правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами: допустимый исходный прогиб заготовки, общий прогиб заготовки перед поперечной обкаткой и степень относительного обжатия. **МЕТОДЫ.** В работе использован математический аппарат, основанный на законах теории упругости твердого тела. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В результате аналитических расчетов установлены основные параметры процесса правки цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. Общий прогиб заготовки перед поперечной обкаткой зависит от ширины выступа плиты, механических свойств материалов и размеров заготовки. Предельный исходный прогиб зависит от материала, диаметра и жесткости заготовки. Предельное относительное обжатие зависит от коэффициента трения между заготовкой и плоскими плитами. **ВЫВОДЫ.** Для правки небольших мало жестких цилиндрических деталей типа валов и осей предложена схема поперечной обкатки плоскими плитами. Обработка происходит за счет упругого изгиба заготовки в направлении, противоположном исходной остаточной деформации и изменения напряженного состояния путем вращения заготовки между плоскими плитами. Разработанная математическая модель дает вполне достоверные значения деформаций изгиба, которые возникают после правки деталей методом поперечной обкаткой плоскими плитами. Аналитическая зависимость для расчетного определения предельного исходного прогиба, общего прогиба при изгибе и величины относительного обжатия может быть рекомендована к практическому использованию в производстве для достижения прецизионной точности мало жестких деталей типа валов.

Ключевые слова: правка, поперечная обкатка, прогиб, относительное обжатие.

Информация о статье. Дата поступления 9 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 13 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Аналитический расчет основных параметров процесса правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 24–34. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-24-34

ANALYTICAL CALCULATION OF THE MAIN PARAMETERS OF SMALL LOW RIGID CYLINDRICAL PARTS STRAIGHTENING BY TRANSVERSE BURNISHING BY FLAT PLATES

S.A. Zaides, Le Hong Quang

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is determination of the main parameters of the straightening process of low rigid cylindrical parts by transverse burnishing by flat plates that include the permissible initial deflection of the workpiece, general deflection of the workpiece before the transverse burnishing and the degree of relative reduction. **METHODS.** The work uses the mathematical apparatus based on the laws of the theory of elasticity of a solid. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The analytical calculations resulted in the determination of the main parameters of the process of straightening cylindrical parts by transverse burnishing by flat plates. The general deflection of the workpiece before

¹Зайдес Семен Азикович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов, e-mail: zsa@istu.edu

Semen A. Zaides, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Machine-Building Technologies and Materials, e-mail: zsa@istu.edu

²Лэ Хонг Куанг, аспирант, e-mail: mybo91@gmail.com

Le Hong Quang, Postgraduate, e-mail: mybo91@gmail.com



transverse burnishing depends on the width of the plate overhang, mechanical properties of material and workpiece dimensions. The ultimate initial deflection depends on the material, diameter and rigidity of the workpiece. The limiting relative reduction depends on the friction coefficient between the workpiece and flat plates. **CONCLUSIONS.** A scheme of transverse burnishing by flat plates is proposed for straightening of small low rigid cylindrical parts of the shaft and axle-type. The straightening is performed due to the elastic bending of the workpiece in the direction opposite to the initial residual deformation and change in the stressed state by workpiece rotation between the flat plates. The developed mathematical model provides reliable values of bending deformations that arise after the straightening of parts by transverse burnishing by flat plates. The analytical dependence for the calculated determination of the limiting initial deflection, general deflection under bending and the value of relative reduction can be recommended for practical use in industry to achieve the precision accuracy of low rigid parts of the shaft type.

Keywords: *straightening, transverse burnishing, deflection, relative reduction*

Information about the article. Received February 9, 2018, 2018; accepted for publication March 13, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Zaides S.A., Le Hong Kuang. Analytical calculation of the main parameters of small low rigid cylindrical parts straightening by transverse burnishing by flat plates. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 24–34. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-24-34

Введение

Среди различных деталей машин свыше 30% составляют тела вращения, из них наиболее трудоемкими и сложными в изготовлении являются детали, обладающие малой жесткостью. Маложесткие цилиндрические детали типа валов и осей широко используются в сельскохозяйственной, горнорудной, автомобильной, авиационной промышленности, а также при изготовлении бытовой техники. Одной из проблем, возникающих при изготовлении таких деталей, является искажение их прямолинейной геометрической формы. На всех стадиях технологического процесса при изготовлении нежестких деталей типа валов и осей с отношением длины к диаметру более 10, в технологический процесс изготовления обычно включают несколько операций правки [1, 2].

Традиционным способом восстановления геометрической формы искривленных деталей является правка. Большой вклад в развитие теории и технологии правки цилиндрических изделий внесли отечественные и зарубежные ученые: Я.Д. Вишняков, А.С. Донсков, В.Н. Емельянов, Н.П. Щапов и др. Однако в некоторых

случаях распространенные способы правки, например, правка изгибом или растяжением, не дают должного результата. Известные способы правки дают временный эффект либо приводят к повреждению поверхности, что недопустимо при восстановлении прямолинейности деталей³ [3, 4].

Для правки маложестких изделий целесообразен отход от традиционных схем обработки. В качестве перспективного направления можно рассматривать правку поперечной обкаткой плоскими плитами как эффективный способ, в значительной степени лишенный вышеуказанных недостатков. Для практической реализации нового способа правки поперечной обкаткой плоскими плитами возникла необходимость расчета основных параметров этого процесса.

Целью данной работы является определение основных параметров процесса правки поперечной обкатки плоскими плитами (допускаемый исходной прогиб заготовки, общий прогиб заготовки перед поперечной обкаткой и степень относительного обжатия).

³Икрин В.А. Сопротивление материалов с элементами теории упругости и пластичности: учебник для студентов, обучающихся по направлению 653500 “Строительство”. М.: Изд-во АСВ, 2004. 424 с. / Ikrin V.A. Material strength with the elements of the theory of elasticity and plasticity: Textbook for students trained in the direction 653500 “Civil Engineering”. Moscow: ACB Publ., 2004, 424 p.



Схема процесса правки

На рис. 1 представлена геометрическая модель процесса правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами. Конструкция для правки состоит из нижней жестко закрепленной плиты 3 и верхней плиты 1, перемещающейся в горизонтальном направлении, между плитами размещена заготовка 2. Нижняя плита имеет два упора 5, на которые опирается заготовка 2. Верхняя плита имеет центральный выступ 4, который используют для нагружения заготовки. Выправление детали осуществляются поэтапно.

Изначально заготовку кладут на нижнюю плиту, при этом вогнутость располагается в направлении упоров 5.

Затем верхняя плита опускается вниз до контакта с заготовкой 2 и перемещается вправо на величину общего прогиба ($f_{\text{общ}}^{\text{max}}$), таким образом реализуется перегиб заготовки, необходимый для ее выправления.

Далее верхняя плита перемещается влево, заготовка принимает прямолинейную форму, верхняя плита перемещается вниз для обеспечения необходимого обжатия.

После этого верхняя плита перемещается влево, клиновой частью захватывает заготовку, которая поворачивается вокруг своей оси и получает пластическую деформацию по всей поверхности.

Сущность правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами заключается в создании напряжений в заготовке путем упругого изгиба в противоположном исходному прогибу направлении (рис. 2) и изменении напряженного состояния в процессе поперечной обкатки плоскими плитами при постоянных параметрах режима пластического деформирования (относительная степень обжатия). Поперечная обкатка необходима для обеспечения стабильности прямолинейной формы заготовки и формирования равновесных остаточных напряжений по объему заготовки. При этом упрочнению подвергают поверхностный слой цилиндрической заготовки.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила установить, что 68% валов из обрабатываемой партии деталей имеют изогнутую ось, форма которой наиболее близко аппроксимируется уравнением параболы второй степени⁴ [5]:

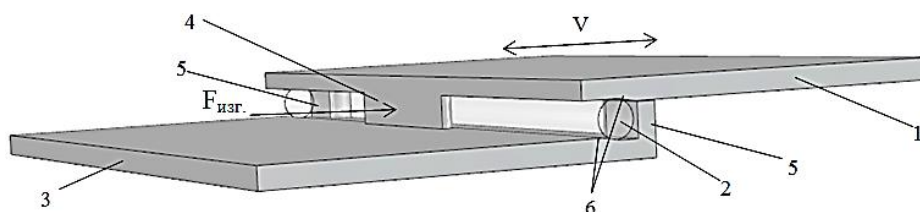


Рис. 1. Геометрическая модель процесса правки мало жестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами:

1 – подвижная верхняя плита; 2 – заготовка; 3 – неподвижная нижняя плита;

4 – выступ верхней плиты; 5 – упоры нижней плиты; 6 – клиновой участок плит

Fig. 1. Geometrical model of the straightening process of low rigid cylindrical parts by transverse burnishing by flat plates:

1 – moving top plate; 2 – workpiece; 3 – stationary bottom plate;

4 – upper plate overhang; 5 – bottom plate stops; 6 – wedge section of plates

⁴Зайдес С.А., Мураткин Г.В. Упрочнение, восстановление, правка валов: учебное пособие / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИргТУ. 2005. 336 с. / Zaides S.A., Muratkin G.V. Hardening, restoration, straightening of shafts: Learning aids / under edition of S.A. Zaides. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2005, 336 p.



$$f_{исх}(z) = \frac{4f_{исх}^{max}}{L} \left(1 - \frac{z}{L}\right) z. \quad (1)$$

У 24% деталей кривая изогнутой оси аппроксимируется по закону синуса⁴ [6]:

$$f_{исх}(z) = f_{исх}^{max} \sin \frac{\pi}{L} z, \quad (2)$$

где $f_{исх}(z)$ – текущее значение исходного прогиба; $f_{исх}^{max}$ – исходный прогиб в середине заготовки; L – общая длина заготовки;

z – текущая координата по длине заготовки.

Остальные 8% деталей имеют винтообразное закручивание вдоль продольной оси⁴. При этом среднее арифметическое значение угла закручивания Ψ сечений относительно друг друга составляет около 8° [5].

Определение максимального общего прогиба заготовки перед поперечной обкаткой плоскими плитами

Для принятой схемы нагружения вала (рис. 2) величины напряжения и прогиба вала определяются по уравнениям, приведенным в [7–9].

Наибольшее напряжение изгиба (в середине вала) определяется как

$$\sigma_{max} = \frac{F_{изг} L}{8W} \left(2 - \frac{l}{L}\right). \quad (3)$$

Прогиб вала на расстоянии z от упора:

$$f_{общ}(z) = \frac{F_{изг} L^3}{48EI} \left\{ \left[3 - \left(\frac{l}{L}\right)^2 \right] \frac{z}{L} - 4 \left(\frac{z}{L}\right)^3 + \right. \\ \left. + 2 \frac{L}{l} \left[\frac{z}{L} + \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L} - 1\right) \right]^4 \right\}. \quad (4)$$

Наибольший прогиб вала (в середине вала):

$$f_{общ}^{max} = f_{общ} \left(\frac{L}{2}\right) = \\ = \frac{F_{изг} L^3}{48EI} \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{l}{L}\right)^3 \right] = \frac{F_{изг} L^3 A_1}{48EI}. \quad (5)$$

Прогиб вала на краю выступа верхней плиты:

$$f_{кр} = \frac{F_{изг} L^3}{48EI} \left[1 - 2 \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \left(\frac{l}{L}\right)^3 \right] = \frac{F_{изг} L^3 A_2}{48EI}, \quad (6)$$

где $F_{изг}$ – усилие изгиба вала от давления выступа верхней плиты; W – осевой момент сопротивления поперечного сечения вала; I – осевой момент инерции поперечного сечения вала; l – ширина выступа верхней плиты; E – модуль упругости I рода материала.

$$A_1 = 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \frac{1}{8} \left(\frac{l}{L}\right)^3;$$

$$A_2 = 1 - 2 \left(\frac{l}{L}\right)^2 + \left(\frac{l}{L}\right)^3.$$

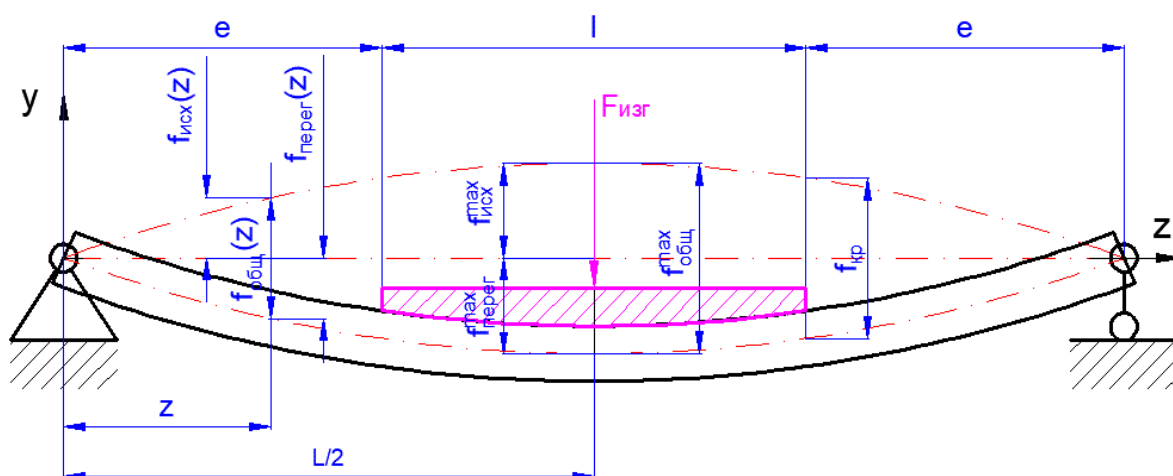


Рис. 2. Схема деформации заготовки перед обработкой поперечной обкаткой плоскими плитами
Fig. 2. Deformation diagram of a workpiece before transverse burnishing by flat plates



Для упрощения расчетов прогиба по уравнениям (5) и (6) значения коэффициентов A_1 и A_2 представлены графически на рис. 3.

При создании изгиба заготовки в направлении, противоположном исходной остаточной деформации, максимальное напряжение изгиба не должно значительно превышать предел текучести материала заготовки:

$$\sigma_{max} \leq \sigma_T, \quad (7)$$

где σ_T – предел текучести материала.

Из равенств (3) и (7) получаем

$$\frac{F_{изг}L}{8W} \left(2 - \frac{l}{L}\right) \leq \sigma_T.$$

Отсюда

$$F_{изг} \leq \frac{8W\sigma_T}{(2L-l)}. \quad (8)$$

Из уравнения (5) получен максимально допустимый прогиб вала перед поперечной обкаткой плоскими плитами:

$$[f_{общ}^{max}] = \frac{8W\sigma_T L^3 A_1}{48EI(2L-l)} = \frac{\sigma_T L^3 A_1}{6ER(2L-l)}, \quad (9)$$

где R – радиус заготовки.

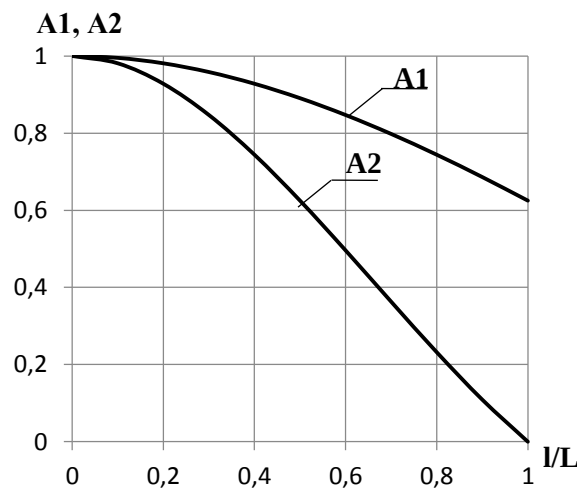


Рис. 3. Зависимость коэффициентов A_1, A_2 от отношения l/L
Fig. 3. Dependence of the coefficients A_1, A_2 on the ratio l/L

Определение предельного исходного прогиба и перегиба при правке маложестких цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами

Технологические возможности предлагаемого способа правки ограничены тем обстоятельством, что при большой величине деформации от воздействия поперечной силы в крайних сечениях обрабатываемого вала может начаться пластическое течение поверхностного слоя материала.

Следовательно, было необходимо просчитать максимальную величину исходного прогиба заготовки, который можно устранить в процессе правки.

Предварительное упругое деформирование заготовки осуществляется путем приложения поперечной силы, позво-

ляющей в каждом поперечном сечении обрабатываемого участка выполнить следующее условие (см. рис. 2):

$$f_{общ}(z) = f_{исх}(z) + f_{перг}(z), \quad (10)$$

где $f_{общ}(z)$ – общая деформация заготовки перед поперечной обкаткой, отсчитываемая от линии центров в текущем поперечном сечении z ; $f_{перг}(z)$ – текущее значение перегиба, отсчитывается от линии центров:

$$f_{перг}(z) = \xi f_{исх}(z), \quad (11)$$



где ξ — коэффициент перегиба;

$$\xi = \frac{f_{\text{общ}}^{\text{max}} - f_{\text{исх}}^{\text{max}}}{f_{\text{исх}}^{\text{max}}}.$$

При $z = e$, поставив в уравнение (1), имеем

$$f_{\text{исх}}(e) = \frac{4f_{\text{исх}}^{\text{max}}}{L} \left(1 - \frac{e}{L}\right) e. \quad (12)$$

Поставив $z = e$ в уравнение (10), получаем

$$f_{\text{общ}}(e) = f_{\text{исх}}(e) + f_{\text{перег}}(e);$$

или

$$f_{\text{кр}} = f_{\text{исх}}(e) + f_{\text{перег}}(e), \quad (13)$$

где

$$e = (L - l)/2, \quad (14)$$

где e — расстояние от торца заготовки до края выступа верхней плиты.

Подставив (6), (11), (12) и (14) в (13), получим равенство

$$f_{\text{исх}}^{\text{max}} = \frac{F_{\text{изг}} L^5 A_2}{48EI(\xi + 1)(L^2 - l^2)}. \quad (15)$$

Подставив (8) в (14), можно рассчитать величину предельно допустимой исходной деформации (прогиба), которую можно устранить данным способом правки:

$$[f_{\text{исх}}^{\text{max}}] = \frac{\sigma_T L^5 A_2}{6ER(\xi + 1)(L^2 - l^2) \cdot (2L - l)},$$

или

$$[f_{\text{исх}}^{\text{max}}] = \frac{\sigma_T L^2 A_2}{3ED(\xi + 1)(1 - \frac{l^2}{L^2}) \cdot (2 - \frac{l}{L})}, \quad (16)$$

где D — диаметр заготовки.

По формуле (16) построены графики зависимости предельного исходного прогиба от диаметра D и жесткости заготовки (отношение L/D) при $l/L = 0,25$; $\xi = 1$; предел текучести σ_T для Ст45 равен 360 МПа (рис. 4).

По формулам (9), (11), (16) построена кривая зависимости предельного значения перегиба от значения исходного прогиба, при $D = 10$ мм и $L/D = 20$ (рис. 5).

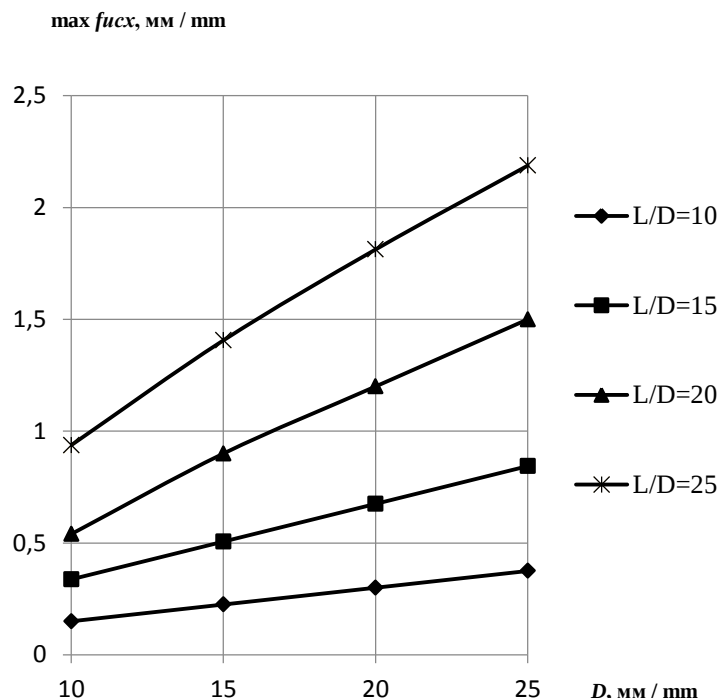


Рис. 4. Зависимость предельного исходного прогиба заготовки от величины диаметра и жесткости заготовки при правке поперечной обкаткой плоскими плитами

Fig. 4. Dependence of the limit initial deflection of a workpiece on its diameter and hardness when straightening by transverse burnishing by flat plates

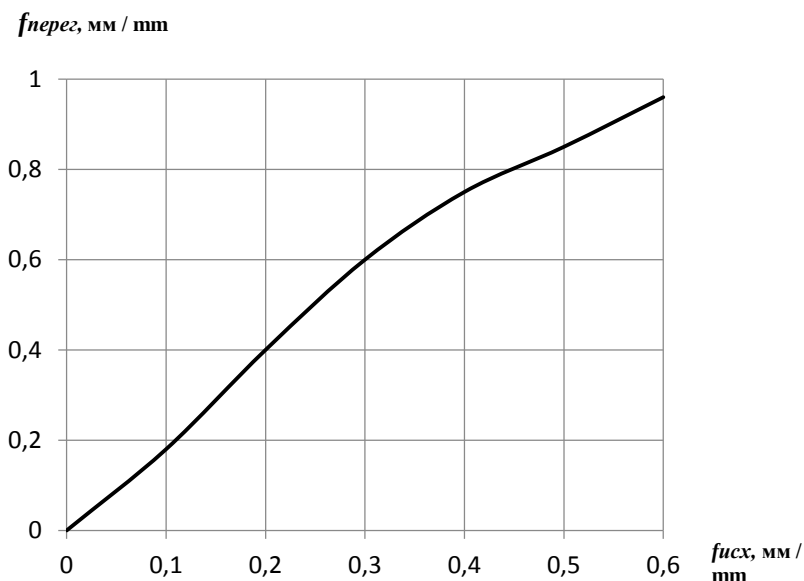


Рис 5. Зависимость предельного перегиба от исходного прогиба заготовки при правке поперечной обкаткой плоскими плитами ($D = 10$ мм и $L/D = 20$)
Fig. 5. Dependence of the limit bend on the initial deflection of the workpiece when straightening by transverse burnishing by flat plates ($D = 10$ mm and $L/D = 20$)

Определение предельного обжатия при поперечной обкатке плоскими плитами

На рис. 6 приведена схема процесса поперечной обкатки плоскими плитами. Как видно из рисунка, ось вращения обкатываемого цилиндрического тела перпендикулярна направлению движения верхней плиты. Расстояние между плитами меньше исходного диаметра цилиндра на величину $2y$, за счет этого диаметр заготовки при обкатке уменьшается. Со стороны каждой из плит к заготовке приложены усилия, которые направлены нормально к контактной площадке. Равнодействующую этих усилий P будем считать приложенной в середине отрезка, соответствующего зоне контакта заготовки с плитами. Нормальные усилия вызывают появление на площадке контакта заготовки с плитами сил трения, равнодействующую которых обозначим через F . Силы трения F приложены в тех же точках, что и нормальные усилия P , и направлены по касательным к площадке контакта.

Согласно [9], ширина площадки соприкосновения заготовки с плитами b при поперечной обкатке рассчитывается как

$$b = \sqrt{yd + 2y^2}. \quad (17)$$

Предельная ширина площадки соприкосновения заготовки и плит определяется как

$$b = \mu \cdot d, \quad (18)$$

где μ – коэффициент трения.

Для определения предельного обжатия за один оборот заготовки при поперечной обкатке воспользуемся формулой (17). Возведя обе части равенства в квадрат, получаем

$$b^2 = yd + 2y^2.$$

После простых преобразований приходим к следующему квадратному уравнению относительно y :

$$y^2 + \frac{d}{2}y - \frac{b^2}{2} = 0.$$

Из этого уравнения

$$y_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \sqrt{\frac{d^2}{16} + \frac{b^2}{2}}.$$

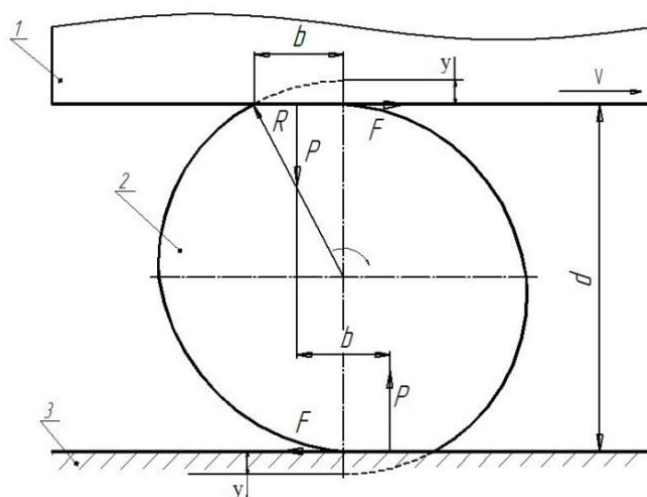


Рис. 6. Схема обжатия цилиндра при поперечной обкатке плоскими плитами [9]:

1 – подвижная плита; 2 – заготовка; 3 – неподвижная плита

Fig. 6. Diagram of cylinder reduction under transverse burnishing by flat plates [9]:

1 – moving plate; 2 – workpiece; 3 – stationary plate

Вынося из-под радикала первый член, получаем:

$$y_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \frac{d}{4} \sqrt{1 + 8 \left(\frac{b}{d}\right)^2}. \quad (19)$$

Величина $\frac{b}{R}$ всегда значительно меньше единицы. Воспользовавшись биномиальным разложением в ряд и отбросив все члены ряда начиная с третьего, получим:

$$\begin{aligned} \sqrt{1 + 8 \left(\frac{b}{R}\right)^2} &= 1 + \frac{1}{2} \cdot 8 \left(\frac{b}{R}\right)^2 - \\ &- \frac{1}{2 \cdot 4} \cdot 8^2 \left(\frac{b}{R}\right)^4 + \\ &+ \frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4 \cdot 6} \cdot 8^3 \left(\frac{b}{R}\right)^6 - \dots \approx 1 + 4 \left(\frac{b}{R}\right)^2. \end{aligned}$$

Таким образом, приходим к следующему приближенному уравнению:

$$y_{1,2} = -\frac{d}{4} \pm \frac{d}{4} \left(1 + 4 \left(\frac{b}{d}\right)^2\right).$$

Исследование этих двух решений показывает, что корнем уравнения, имеющим физический смысл, является

$$y_1 = -\frac{d}{4} + \frac{d}{4} \left(1 + 4 \left(\frac{b}{d}\right)^2\right).$$

После простых преобразований получаем, что

$$y = \frac{b^2}{d}. \quad (20)$$

Подставляя равенство (18) в выражение (20), имеем

$$y = \frac{\mu^2 \cdot d^2}{d} = \mu^2 \cdot d. \quad (21)$$

По равенству (21) можно определить максимальную величину относительного обжатия заготовки в плитах в зависимости от коэффициента трения.

Относительное обжатие при обкатке определяется по формуле

$$Q = \frac{D^2 - d^2}{D^2} \cdot 100\%,$$

Эту формулу можно представить в следующем виде:

$$Q = \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2\right) \cdot 100\%.$$

Исходный диаметр заготовки D можно выразить через конечный диаметр d :

$$D = d + 2y = d + 2\mu^2 \cdot d = (1 + 2\mu^2)d.$$

Тогда получим предельное значение



$$Q = \left(1 - \left(\frac{1}{1+2\mu^2}\right)^2\right) \cdot 100\%, \quad (22)$$

и максимальное значение абсолютного обжатия:

$$\Delta H = D - d = 2y = \frac{2\mu^2 D}{(2\mu^2 + 1)}. \quad (23)$$

Значение коэффициента трения для пары сталь–сталь при холодной обкатке

находится в пределах от 0,03 до 0,15 [10–12]. По формуле (22) построена кривая зависимости предельного относительного обжатия от коэффициента трения (рис. 7).

Таким образом, в результате аналитических расчетов установлены основные параметры процесса правки цилиндрических деталей поперечной обкаткой плоскими плитами.

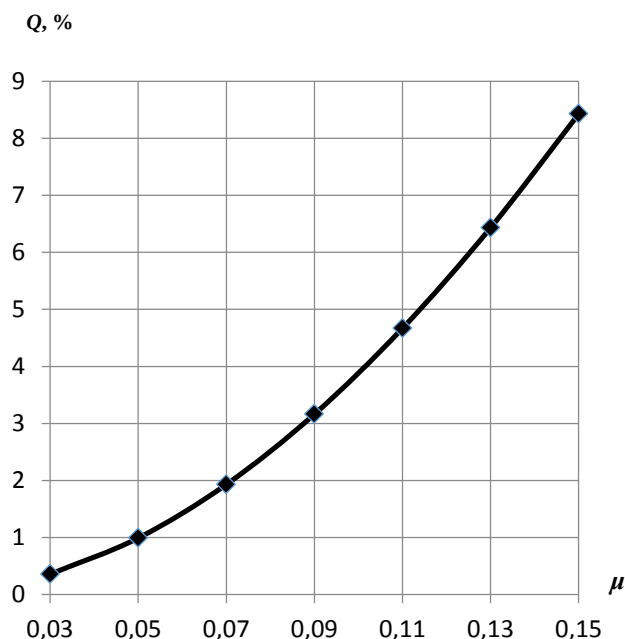


Рис. 7. Зависимость предельного относительного обжатия от коэффициента трения
Fig. 7. Dependence of the limiting relative reduction on the coefficient of friction

Выводы

1. Для правки небольших маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей предложена схема поперечной обкатки плоскими плитами. Обработка происходит за счет упругого изгиба заготовки в направлении, противоположном исходной остаточной деформации, и изменения напряженного состояния путем вращения заготовки между плоскими плитами.

2. Разработанная математическая модель процесса правки дает вполне достоверные значения деформации изгиба, которые возникают после правки деталей методом поперечной обкатки плоскими плитами. Аналитическая зависимость для расчетного определения предельного ис-

ходного прогиба, общего прогиба при изгибе и степени относительного обжатия может быть рекомендована к практическому использованию в производстве для достижения прецизионной точности маложестких деталей типа валов.

3. Определена величина прогиба заготовки перед поперечной обкаткой, зависящая от ширины выступа плиты, материала и размера заготовки. Предельный исходный прогиб зависит от материала, диаметра и жесткости заготовки. Величина предельного относительного обжатия зависит от коэффициента трения между заготовкой и плоскими плитами.



Библиографический список

1. Зайдес С.А., Емельянов В.Н. Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. 380 с.
2. Драчев О.И., Бобровский А.В., Воронов Д.Ю. Метод снижения коробления маложестких валов // Машиностроитель. 2001. № 6. С. 20–23.
3. Лапшин П.Н., Огнев О.Г., Манило И.И. Правка валов совместным действием поперечных и продольных сил // Аграрная наука: проблемы и перспективы: материалы науч.-практ. конф. (г. Курган, 2002 г.). Курган, 2002. С. 399–401.
4. Бубнов А.С. Технологические возможности процесса правки маложестких цилиндрических деталей стесненным сжатием // Вестник ИрГТУ. 2006. № 4. С. 68–75.
5. Манило И.И. Повышение эффективности правки, длинномерных деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники – технологический резерв ремонтного производства // Материалы XLII науч.-техн. конф.: в 3 ч. (Челябинск, 30 января – 1 февраля 2003 г.). Челябинск, 2003. С. 234–240.
6. Смирнов В.С. и др. Поперечная прокатка в машиностроении. М.: Машгиз, 1957. 376 с.
7. Сахненко В.Л. Холодная гибка и правка деталей. М.: Машгиз, 1951. 108 с.
8. Бубнов А.С. Автоматизация процесса правки стесненным сжатием // Вестник ИрГТУ. 2010. № 5 (45). С. 22–26.
9. Фам Дак Фыонг, Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании // Вестник ИрГТУ. 2015. № 4 (99). С. 48–52.
10. Мураткин Г.В., Катова И.В. Математическая модель процесса правки деталей методом поверхностного пластического деформирования с предварительным изгибом заготовки // Обработка металлов давлением. 2004. № 6. С. 27–31.
11. Иванова Л.Н. Деформация валов и опор цилиндрических редукторов как фактор влияния на нагрузочную способность передачи // Вестник машиностроения. 2002. № 11. С. 17–22.
12. Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. М.: Машиностроение, 2007. 399 с.

References

1. Zaides S.A., Emelyanov V.N. *Vliyaniye poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya na kachestvo valov* [Effect of surface plastic deformation on the quality of shafts]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2017, 380 p. (In Russian).
2. Drachev O.I., Bobrovsky O.I., Voronov D.Yu. The method to reduce buckling of low rigidity shafts. *Mashinostroitel'* [Mechanical Engineer], 2001, no. 6, pp. 20–23. (In Russian).
3. Lapshin P.N., Ognev O.G., Manilo I.I. *Pravka valov sovmestnym deystviyem poperechnykh i prodol'nykh sil* [Shaft straightening by the joint action of transverse and longitudinal forces]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii Agrarnaya nauka "Problemy i perspektivy"* [Proceedings of the Scientific and Practical Conference "Agrarian Science: Problems and Perspectives" (Kurgan, 2002)]. Kurgan, 2002, pp. 399–401. (In Russian).
4. Bubnov A.S. Technological possibilities of the process of straightening low rigid cylindrical parts by constrained compression. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2006, no. 4. pp. 68–75. (In Russian).
5. Manilo I.I. *Povysheniye jeffektivnosti pravki, dlinnomernykh detalej avtotraktornoy i sel'skohozjajstvennoy tekhniki – tehnologicheskij rezerv remontnogo proizvodstva* [Improving efficiency of straightening long parts of autotractor and agricultural machinery – a technological reserve of repair production]. *Materialy XLII nauchno-tehnicheskoy konferencii Cheljabinskogo gosudarstvennogo agroinzhenerenogo universiteta: v treh chastyah* [Materials of XLII Scientific and Technical Conference of Chelyabinsk State Agroengineering University: in 3 parts, Chelyabinsk, 30 January – 1 February 2003]. Cheljabinsk, 2003, pp. 234–240. (In Russian).
6. Smirnov V.S. and etc. *Poperechnaya prokatka v mashinostroyenii* [Cross-rolling in mechanical engineering]. Moscow: Mashgiz, 1957, 376 p. (In Russian).
7. Sakhnenko V.L. *Kholodnaya gibka i pravka detaley* [Cold bending and straightening of parts]. Moscow: Mashgiz Publ., 1951. 108 p. (In Russian).
8. Bubnov A.S. Automation of the correcting process by constrained compression. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2010, no. 5 (45), pp. 22–26. (In Russian).
9. Pham Dac Phuong, Zaides S.A., Nguyen Van Huan. Determination of transverse burnishing conditions under surface plastic deformation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 4 (99), pp. 48–52. (In Russian).
10. Muratkin G.V., Katova I.V. Mathematical model of



part straightening by the method of surface plastic deformation with the preliminary bending of the billet. *Obrabotka metallov davleniem* [Pressure treatment of metals]. 2004. no. 6, pp. 27–31. (In Russian).

11. Ivanova L.N. Deformation of shafts and supports of cylindrical gearboxes as a factor influencing transmission load capacity. *Vestnik Mashinostroeniya* [Bulletin of Machine Building]. 2002, no. 11, pp. 17–22. (In Rus-

sian).

12. Blyumenshteyn V.YU., Smelyanskiy V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin* [Mechanics of technological inheritance at the stages of processing and operation of machine parts]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 2007, 399 p. (In Russian).

Критерии авторства

Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Zaides S.A., Le Hong Kuang 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.98.042

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-35-43>

МОЩНОСТЬ ПРИВОДА КАК ПАРАМЕТР УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЗАЧИСТКИ ПОВЕРХНОСТИ ЛЕПЕСТКОВЫМ КРУГОМ

© Зыонг Ван Лонг¹, В.П. Кольцов², Ле Чи Винь³, Д.А. Стародубцева⁴

¹Ханойский национальный научно-исследовательский институт механики,
Вьетнам, г. Ханой, р. Кау Жаи, ул. Фам Ван Донг, 4, оф. 501.

^{2,3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. К настоящему времени зачистка поверхностей лепестковым кругом занимает твердое место в процессах изготовления крупногабаритных деталей в самолетостроении. Основными режимными параметрами процесса являются частота вращения лепесткового круга, продольная подача и осадка (деформация) круга. При этом при зачистке панелей и обшивок, имеющих непостоянную кривизну обрабатываемой поверхности, контроль и регулировка фактической величины осадки лепесткового круга во время работы является достаточно проблематичной задачей. Выход был найден в использовании в качестве режимного параметра расходуемой на зачистку эффективной мощности привода. Фактически затрачиваемая на обработку мощность является комплексным параметром, который в свою очередь зависит и от частоты вращения, величины подачи и особенно от осадки круга, но, тем не менее, при постоянных значениях частоты и подачи он может быть эффективным режимным параметром. **ЦЕЛЬ.** Проверка возможности использования эффективной мощности как параметра управления, определяющего динамику и производительность процесса зачистки. **МЕТОД.** Аналитический анализ и экспериментальная проверка. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Показано, что эффективная мощность привода может быть успешно использована в качестве параметра управления процессом зачистки лепестковым кругом.

Ключевые слова: абразивная зачистка, лепестковый круг, управление, осадка, мощность, параметр обработки.

Информация о статье. Дата поступления 13 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 21 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Зыонг Ван Лонг, Кольцов В.П., Ле Чи Винь, Стародубцева Д.А. Мощность привода как параметр управления процессом зачистки поверхности лепестковым кругом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 35–43. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-35-43

DRIVE POWER AS A CONTROL PARAMETER OF SURFACE GRINDING BY A FLAP WHEEL

Duong Van Long, V.P. Koltsov, Le Tri Vinh, D.A. Starodubtseva

Hanoi National Research Institute of Mechanical Engineering,
4, Pham Van Dong St., office 501, Cau Giay District, Hanoi, Vietnam

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

¹Зыонг Ван Лонг, кандидат технических наук, директор центра технологий и оборудования защиты окружающей среды, e-mail: longdv.mt@narime.gov.vn

Duong Van Long, Candidate of technical sciences, Director of the Environment Technologies and Equipment Center, e-mail: longdv.mt@narime.gov.vn

²Кольцов Владимир Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: kolcov@istu.edu

Vladimir P. Koltsov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: kolcov@istu.edu

³Ле Чи Винь, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительных производств, e-mail: vinh_istu@mail.ru

³Le Tri Vinh, Candidate of technical sciences, associate professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, e-mail: vinh_istu@mail.ru

⁴Стародубцева Дарья Александровна, магистрант, e-mail: d.star-irk@yandex.ru
Daria A. Starodubtseva, Master's degree student, e-mail: d.star-irk@yandex.ru



ABSTRACT. Today, the abrasive grinding of surfaces by flap wheels is widely used in aircraft construction under the manufacturing of large-sized parts. The main operating parameters of the process are flap wheel rotation frequency, longitudinal feed and wheel upset (deformation). At the same time, when grinding panels and skins featuring a non-constant curvature of the machined surface it is rather difficult to monitor and adjust the actual value of the flap wheel upset in operation. The solution is to use the drive effective power consumed for grinding as a mode parameter. In fact, the power consumed for machining is a complex parameter that in its turn depends on the rotation frequency, the value of feed and especially on the flap wheel upset value. However, it can be an effective mode parameter if frequency and feed rates are constant. The **PURPOSE** of the paper is testing the possibility of using effective power as a control parameter that determines the dynamics and performance of the grinding process. The **METHODS** used in the study involve analytical analysis and experimental verification. **RESULTS.** It is shown that the drive effective power can be successfully used as a control parameter of the process of grinding by flap wheels.

Keywords: abrasive grinding, flap wheel, control, upse, power, processing parameter

Information about the article. Received February 13, 2018; accepted for publication February 21, 2018; available online March 31, 2018.

For citations. Duong Van Long, Koltsov V.P., Le Tri Vinh, Starodubtseva D.A. Drive power as a control parameter of surface grinding by a flap wheel. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 35–43. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-35-43

Введение

В технологических процессах изготовления длинномерных панелей и обшивок после дробеударного формообразования, для обеспечения требуемых параметров шероховатости, поверхность детали зачищается абразивным лепестковым кругом (ЛК). Зачастую панели и обшивки имеют значительные габариты (до 35×2,5 м) при малой толщине (до нескольких мм) и сложно-переменную кривизну [1, 2]. При зачистке таких деталей необходимо обеспечить равномерность съема и постоянство значений параметров шероховатости по всей обрабатываемой поверхности.

Используемые для зачистки панелей и обшивок лепестковые круги типа КК751, изготовленные по ТУ 3985-002-81924505-99⁵, представляют собой набор выгнутых абразивной стороной наружу лепестков, радиально закрепленных на оправке. При вращении такого круга абразивные лепестки распрямляются, и увеличивается диаметр круга на 10–15 мм. Величина осадки (деформации) лепесткового круга при обработке таких деталей лежит в пределах

2–8 мм [3]. Кроме того, при обработке значительных по площади поверхностей деталей имеет место существенный износ абразива лепесткового круга (до 0,08 мм/мин)⁶ [4].

Двойная кривизна обрабатываемой поверхности, непостоянство геометрических размеров круга и необходимость одновременного управления несколькими параметрами обработки [5] в значительной степени усложняют задачу обеспечения равномерного съема и шероховатости по всей поверхности детали. Выходом из такой ситуации может быть использование для управления процессом резания эффективной мощности, которая необходима для реализации процесса зачистки [6–10]. Поскольку кинематическая цепь от электродвигателя к лепестковому кругу минимальна [11], потери на трение в кинематических парах привода можно считать незначительными.

В подобном случае, например, при шлифовании полимерно-абразивными щетками, авторы работы [8] также выделяют

⁵ТУ 3985-002-81924505-99. Круги шлифовальные лепестковые. Технические условия / TU 3985-002-81924505-99. Grinding flap wheels. Technical specifications.

⁶Подашев Д.Б. Оптимизация финишной обработки деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов эластичным абразивным инструментом: дис. ... канд. техн. наук.; Иркутск, 2014 / Podashev D.B. Optimization of finishing processing of high-strength aluminum alloy parts by elastic abrasive tools. Candidate's dissertation in technical sciences; 05.02.07; 05.02.08. Irkutsk, 2014.



мощность как параметр, определяющий динамические особенности процесса, силы резания, величину давления инструмента на обрабатываемую поверхность и харак-

тер стружкообразования, что в конечном итоге определяет интенсивность съема и качество поверхностного слоя детали.

Зависимость мощности электропривода от величины осадки лепесткового круга при зачистке

Мощность, необходимая для осуществления вращения лепесткового круга и снятия материала в процессе зачистки, численно равна мощности, потребляемой приводом лепесткового круга. Эта суммарная мощность включает в себя мощность холостого хода и мощность, затрачиваемую на процесс резания. Мощность холостого хода необходима для вращения круга без касания с поверхностью обрабатываемой детали, а мощность зачистки – для преодоления сил резания.

В рассматриваемом случае, как и в работе [8], для выполнения операции зачистки поверхности требуемая мощность привода зависит от тангенциальной силы резания, диаметра и частоты вращения лепесткового круга, что определяется следующим выражением:

$$N_3 = \frac{P_z \cdot \pi \cdot D_k \cdot n}{102 \cdot 60 \cdot 1000}, \quad (1)$$

где $N_{3\phi}$ – эффективная мощность привода, кВт; P_z – тангенциальная сила резания, кгс;

D_k – диаметр лепесткового круга, мм;
 n – частота вращения лепесткового круга, об./мин,
или

$$N_{3\phi} = M \cdot \omega = P_z \cdot R \cdot \omega, \quad (2)$$

где M – момент резания, кгс·м; ω – угловая скорость, 1/с; P_z – окружная сила (сила резания), кгс; R – радиус лепесткового круга, мм.

В то же время

$$N_{3\phi} = I \cdot U, \quad (3)$$

где I – ток, А; U – напряжение, В.

$$I \cdot U = P_z \cdot R \cdot \omega. \quad (4)$$

Контролируя силу тока при постоянном напряжении, отслеживают мощность, затрачиваемую на обработку, и, соответственно, производительность зачистки.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования зависимости изменения мощности электропривода от величины осадки при различных значениях частоты вращения лепесткового круга были выполнены на установке УДФ-4 с зачистной головкой револьверного типа ЗГР-1 (рис. 1) [11]. В качестве главного привода лепесткового круга револьверной головки ЗГР-1 установлен электродвигатель Siemens модели 1PH7103, позволяющий контролировать потребляемую силу тока, выходное напряжение, момент вращения, эффективную мощность и другие параметры процесса.

Для установки УДФ-4 мощность является одним из регистрируемых параметров системы ЧПУ и выдается на экран пульта управления (рис. 2). В зависимости от нагрузки на электродвигатель во время работы установки пользователь в режиме реального времени может отслеживать переменные процесса. Для удобства значение каждого параметра выведено в отдельном окне рабочей программы. Так, например, для переменной «эффективная мощность», кВт, с помощью вызова соответствующей функции обращения к системе ЧПУ (`/acx/drv_dc_tea/32[u1]`) выходят



Рис. 1. Установка УДФ-4 с зачистной головкой револьверного типа ЗГР-1:
1 – установка УДФ-4; 2 – сменный рабочий орган установки, зачистная головка ЗГР-1;
3 – лепестковые круги; 4 – двигатель главного движения; 5 – пульт управления
Fig. 1. UDF-4 installation with the grinding head of turret type ZGR-1,
1 – UDF-4 installation; 2 – removable effector, grinding head ZGR-1;
3 – flap wheels; 4 – main engine; 5 – control panel

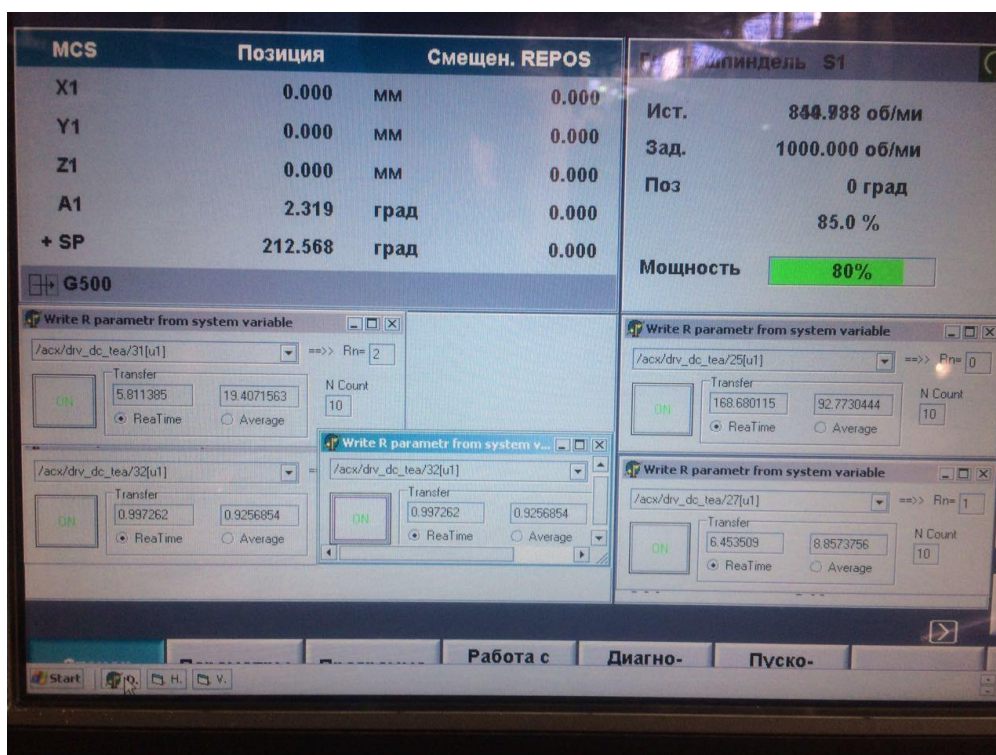


Рис. 2. Интерфейс окна обработки
Fig. 2. Processing window interface



два истинных значения в реальном времени *Realtime* – 0,997262 и среднее между 10 последовательными значениями *Average* – 0,9256854.

Эксперименты выполнены для лепесткового круга КК751 диаметром 350 мм шириной 100, 200 и 300 мм при различных значениях частоты вращения (600, 800, 1000 и 1200 об./мин). В качестве опытного образца использована плита из алюминиевого сплава В95 размером 500×700×10 мм.

Для примера в табл. 1 приведены результаты измерения значений эффективной мощности при осадке 1, 2, 3 и 4 мм для лепесткового круга шириной 100 мм.

Графики зависимости эффективной мощности от величины осадки лепесткового круга для разных частот вращения лепесткового круга представлены на рис. 3–5.

На основании полученных значений эффективной мощности построены линейные зависимости (табл. 2).

Таблица 1

Эффективная мощность электропривода для лепесткового круга шириной 100 мм

Table 1

Effective power of the electric drive of the 100 mm-width flap wheel

Частота вращения ЛК, об./мин / Flap wheel rotation frequency, rpm	Эффективная мощность электропривода, кВт / Electric drive effective power, kW				
	Холостой ход / Idling	Осадка, мм / Upset, mm			
		1	2	3	4
600	0,1225461	0,27875485	0,3140163	0,36810645	0,4107155
800	0,1916721	0,4722685	0,67349195	0,8388931	1,00429425
1000	0,3167431	0,543315	0,87141685	1,03224575	1,20140985
1200	0,39889765	0,83447785	1,11508955	1,37222905	1,60284105

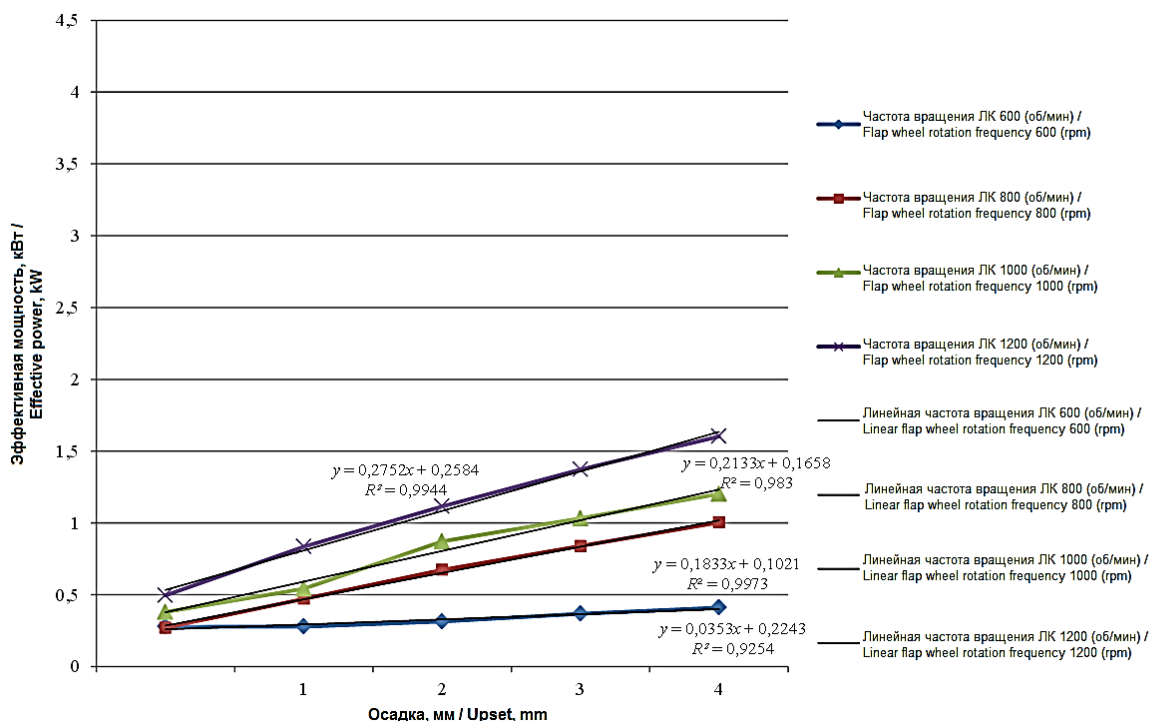


Рис. 3. Графики зависимости эффективной мощности от величины осадки лепесткового круга шириной 100 мм при различных значениях частоты вращения, об./мин

Fig. 3. Graphs of effective power dependence on the upset value (mm) of the 100 mm-width flap wheel for the different values of rotation frequency, rpm

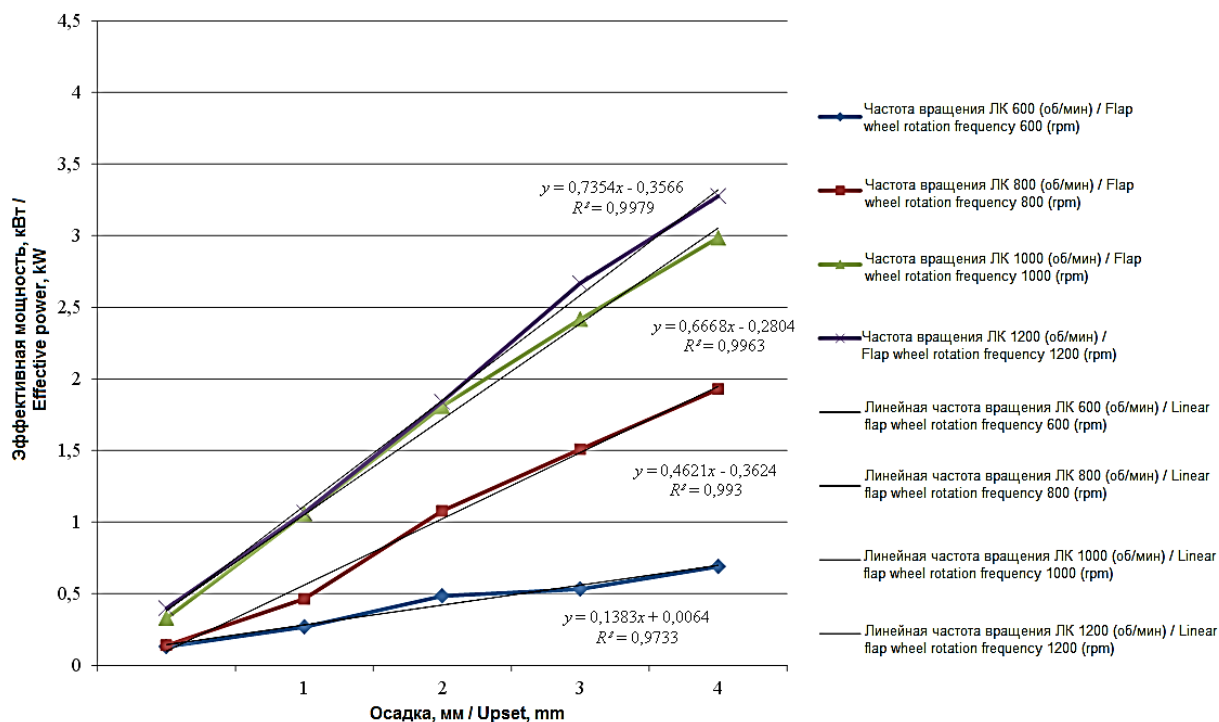


Рис. 4. Графики зависимости эффективной мощности от величины осадки лепесткового круга шириной 200 мм при различных значениях частоты вращения, об/мин
Fig. 4. Graphs of effective power dependence on the upset value (mm) of the 200 mm-width flap wheel for the different values of rotation frequency, rpm

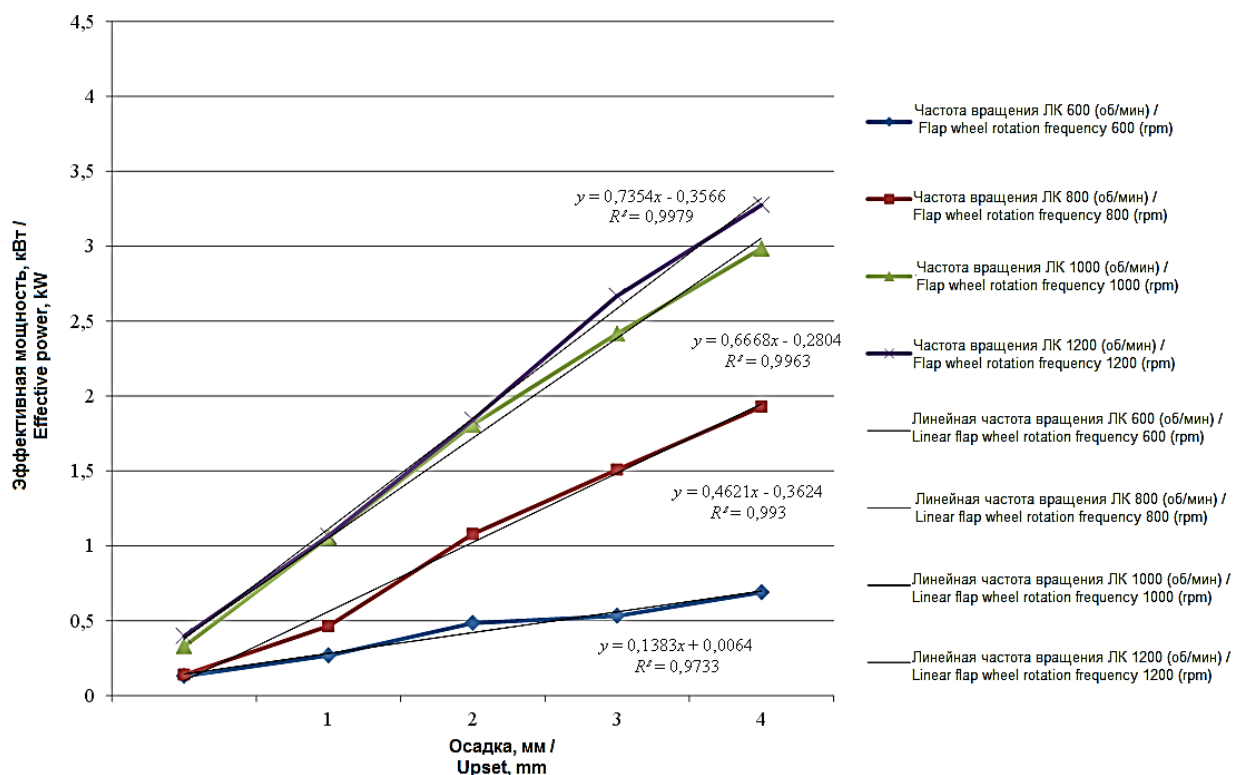


Рис. 5. Графики зависимости эффективной мощности от величины осадки лепесткового круга шириной 300 мм при различных значениях частоты вращения, об/мин
Fig. 5. Graphs of effective power dependence on the upset value (mm) of the 300 mm-width flap wheel for the different values of rotation frequency, rpm



Таблица 2

**Зависимость эффективной мощности от величины осадки
лепесткового круга при различных значениях частоты вращения**

Table 2

**Effective power dependence on the value of the flap wheel upset
at different values of the rotation frequency**

Лепестковый круг диаметром 350 мм / Flap wheel of 350 mm diameter		Частота вращения, об./мин / Rotation frequency, rpm	Зависимость эффективной мощности, кВт, от осадки, мм / Effective power (kW) dependence on upset (mm)	Достоверность аппроксимации / Approximation certainty
Ширина, мм / Width, mm	100	600	$y = 0,0353x + 0,2243$	0,9254
		800	$y = 0,1833x + 0,1021$	0,9973
		1000	$y = 0,2133x + 0,1658$	0,9830
		1200	$y = 0,2752x + 0,2584$	0,9944
	200	600	$y = 0,1383x + 0,0064$	0,9733
		800	$y = 0,4621x - 0,3624$	0,9930
		1000	$y = 0,6668x - 0,2804$	0,9963
		1200	$y = 0,7354x - 0,3566$	0,9979
	300	600	$y = 0,2848x - 0,0401$	0,9824
		800	$y = 0,5276x - 0,2795$	0,9960
		1000	$y = 0,748x - 0,5415$	0,9809
		1200	$y = 0,9629x - 0,5452$	0,9977

Из анализа полученных линейных зависимостей (см. табл. 2) следует, что, несмотря на изменение частоты вращения и ширины лепесткового круга, эффективная мощность электропривода прямо пропор-

циональна величине осадки лепесткового круга. В результате преобразования зависимостей, представленных в табл. 2, получены уравнения для определения величины осадки лепесткового круга (табл. 3).

Таблица 3

**Уравнения для определения величины осадки
лепесткового круга в зависимости от эффективной мощности**

Table 3

**Equations for determining the value of the flap wheel upset
as a function of the effective power**

Лепестковый круг диаметром 350 мм / Flap wheel of 350 mm diameter		Частота вращения, об./мин / Rotation frequency, rpm	Зависимость величины осадки лепесткового круга от эффективной мощности* / Flap wheel upset value dependence on the effective power*
Ширина, мм / Width, mm	100	600	$\Delta = 28,3286 \cdot N - 6,3541$
		800	$\Delta = 5,4555 \cdot N - 0,5570$
		1000	$\Delta = 4,6882 \cdot N - 0,7773$
		1200	$\Delta = 3,6337 \cdot N - 0,9390$
	200	600	$\Delta = 7,2307 \cdot N - 0,0463$
		800	$\Delta = 2,1640 \cdot N + 0,7842$
		1000	$\Delta = 1,4997 \cdot N + 0,4205$
		1200	$\Delta = 1,3598 \cdot N + 0,4849$
	300	600	$\Delta = 3,5112 \cdot N + 0,1408$
		800	$\Delta = 1,8954 \cdot N + 0,5298$
		1000	$\Delta = 1,3369 \cdot N + 0,7239$
		1200	$\Delta = 1,0385 \cdot N + 0,5662$

* Δ – осадка, мм / upset, mm; N – эффективная мощность, кВт / effective power, kW



На основании полученных уравнений (см. табл. 3) можно вычислить значение величины осадки лепесткового круга, не прибегая к достаточно трудоемким и неточным измерениям (величина натяга – радиальная подача). Это упрощает задачу

корректировки величины осадки лепесткового круга во время зачистки поверхности панелей и обшивок планера летательного аппарата без необходимости измерения износа абразивного инструмента.

Выводы

Проведенные эксперименты доказали, что при постоянных значениях ширины лепесткового круга и частоты вращения мощность электропривода прямо пропор-

циональна величине осадки. Эффективная мощность привода может использоваться в качестве параметра управления процессом зачистки лепестковым кругом.

Библиографический список

1. Пашков А.Е. Технологические связи в процессе изготовления длинномерных листовых деталей. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2005. 138 с.
2. Пашков А.Е. О создании комплексной технологии формообразования крупногабаритных панелей // Высокоэффективные технологии проектирования, конструкторско-технологической подготовки и изготовления самолетов: материалы Всерос. с междунар. участием науч.-практ. семинара (Иркутск, 9–11 ноября 2011 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ. С. 103–110.
3. Димов Ю.В. Перспективы использования лепестковых кругов при изготовлении деталей самолета // Повышение эффективности технологических процессов в машиностроении: сб. науч. тр. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. С. 3–10.
4. Димов Ю.В., Подашев Д.Б. Силы резания при обработке эластичными абразивными кругами // Вестник ИрГТУ. 2015. № 7 (102). С. 47–54.
5. Стародубцева Д.А. Особенности использования абразивных лепестковых кругов для зачистки поверхностей двойной кривизны // Авиационное машиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. IX Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 12–15 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2017. С. 254–259.
6. Кольцов В.П., Стародубцева Д.А., Козырева М.В. Анализ зависимостей съема и шероховатости поверхности детали при обработке лепестковыми

- кругами по результатам факторного эксперимента // Вестник ИрГТУ. 2015. № 1 (96). С. 32–41.
7. Бондаренко М.А., Чапышев А.П. О разработке установки с численным программным управлением для зачистки криволинейных поверхностей // Вестник ИрГТУ. 2011. № 10 (57). С. 24–29.
8. Устинович Д.Ф., Прибыльский В.И. Зависимость мощности от режимов шлифования полимерно-абразивными дисковыми щечками // Механика машин, механизмов и материалов. 2012. № 1 (18). С. 75–79.
9. Алейников Д.П., Лукьянов А.В. Моделирование сил резания и определение вибродиагностических признаков дефектов концевых фрез // Системы. Методы. Технологии. 2017. № 1 (33). С. 39–47. <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-1-39-47>
10. Лукьянов А.В., Алейников Д.П., Портной А.Ю. Система защиты обрабатываемых центров от опасных динамических нагрузок на основе анализа параметров вибрации и силы // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 4. С. 30–38. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-30-38>
11. Стародубцева Д.А. Револьверная головка для зачистки панелей и обшивок лепестковыми кругами после дробеударного формообразования. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2015. № 4 (48). С. 34–37.

References

1. Pashkov A.E. *Tekhnologicheskie svyazi v protsesse izgotovleniya dlinnomernykh listovykh detalei* [Technological Relationships under Production of Long Sheet Parts]. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2005, 138 p. (In Russian).
2. Pashkov A.E. *O sozdanii kompleksnoi tekhnologii formobrazovaniya krupnogabaritnykh panelei* [On Creation of a Complex Large Panel Forming Technology]. *Materialy Vserossiiskogo s*

- mezhdunarodnym uchastiem nauchno-prakticheskogo seminara "Vysokoeffektivnye tekhnologii proektirovaniya, konstruktorsko-tekhnologicheskoi podgotovki i izgotovleniya samoletov"* [Proceedings of All-Russian Scientific and Practical Workshop with International Participation "Highly Efficient Technologies of Designing, Design-Engineering Preparation and Manufacturing of Airplanes"]. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., pp. 103–110. (In Russian).



3. Dimov Yu.V. *Perspektivy ispol'zovaniya lepestkovykh krugov pri izgotovlenii detalei samoleta* [Application Prospects of Flap Wheels in Aircraft Parts Manufacturing]. *Sbornik nauchnykh trudov "Povyshenie effektivnosti tekhnologicheskikh protsessov v mashinostroenii"* [Collection of scientific papers "Improving Efficiency of Technological Processes in Mechanical Engineering"]. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2000, pp. 3–10. (In Russian).
4. Dimov Yu.V., Podashev D.B. Cutting Forces in Machining by Elastic Abrasive Wheels. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 7 (102), pp. 47–54. (In Russian).
5. Starodubtseva D.A. *Osobennosti ispol'zovaniya abrazivnykh lepestkovykh krugov dlya zachistki poverkhnostei dvoinoi krivizny* [Application Features of Abrasive Flap Wheels for Double Curvature Surface Conditioning]. *Sbornik statei IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collection of articles of IX All-Russian Scientific and Practical Conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia"]. Irkutsk: Irkutskii natsional'nyi issledovatel'skii tekhnicheskii universitet Publ., 2017, pp. 254–259. (In Russian).
6. Koltsov V.P., Starodubtseva D.A., Kozyreva M.V. [Analysis of Cuttings and Part Surface Roughness Dependences under Flap Wheel Machining according to Factorial Experiment Results]. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015,

no. 1 (96), pp. 32–41. (In Russian).

7. Bondarenko M.A., Chapyshev A.P. On the Development of a Plant with Numerical Program Control for Curvilinear Surfaces Grinding. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2011, no. 10 (57), pp. 24–29. (In Russian).
8. Ustinovich D.F., Pribyl'skii V.I. Effect of Processing Conditions on Power of Grinding by Polymeric-Abrasive Disc Brushes. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials]. 2012, no. 1 (18), pp. 75–79. (In Russian).
9. Aleinikov D.P., Luk'yanov A.V. Cutting Forces Modeling and Vibration Diagnostics of Signs of End Mills Defects. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2017, no. 1 (33), pp. 39–47. (In Russian). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2017-1-39-47>
10. Luk'yanov A.V., Aleinikov D.P., Portnoi A.Yu. Vibration and Force Parameter Analysis-Based System of Machining Center Protection from Dangerous Dynamic Loads. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 4, pp. 30–38. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-4-30-38>
11. Starodubtseva D.A. A Turret for Grinding of Panels and Covers by Flap Wheel after Shot Peen Forming. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2015, no. 4 (48), pp. 34–37. (In Russian).

Критерии авторства

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

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

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 614.841

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-44-54>

РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫХ ПОЖАРНЫХ СТВОЛОВ ОСИПОВЫХ

© А.Г. Осипов¹

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Представлены результаты расчетно-теоретических и практических исследований универсальных пожарных стволов Осиповых (УПСО), используемых при тушении открытых пожаров нефтепродуктов, транспортных средств, древесины, взрывчатых, ядовитых и других веществ и материалов. Рассмотрены ручные и лафетные версии этих стволов, приведен порядок расчетов их основных технических показателей, проведены экспериментальные исследования стволов в полигонных условиях и дана объективная оценка эффективности работы УПСО. **МЕТОДЫ.** При оптимизации проточной части УПСО использовано микроманометрическое построение эпюр скоростей потока. Сравнительная оценка технических показателей существующих и разработанных стволов проведена методом полигонных испытаний. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Результаты исследований показали, что УПСО обладают наибольшей дальностью пенной струи и подают воздушно-механическую пену средней кратности на расстояние 40–45 м, что на 10 м превосходит дальность подачи существующих стволов. Кроме отмеченного пена, приготавливаемая существующими стволами, имеет низкую кратность и, следовательно, невысокую огнетушащую способность. **ВЫВОДЫ.** Установлены более высокие, по сравнению с существующими стволами, технические показатели УПСО, свидетельствующие о целесообразности практического применения этих стволов.

Ключевые слова: открытые пожары, технические средства пожаротушения, ручные пожарные стволы, лафетные пожарные стволы, оптимизация основных показателей ствола, эффективность тушения.

Информация о статье. Дата поступления 19 января 2018 г.; дата принятия к печати 12 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Осипов А.Г. Расчетно-теоретические и практические исследования универсальных пожарных стволов Осиповых // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 44–54. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-44-54

THEORETICAL COMPUTATION AND PRACTICAL STUDIES OF THE OSIPOVS' MULTI-PURPOSE FIRE NOZZLES

A.G. Osipov

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The article presents the results of theoretical computation and practical studies of the Osipovs' multi-purpose fire nozzle (OMFN) used for extinguishing of large-scale open fires of oil products, vehicles, woods, explosives, toxic substances and other materials. Consideration is given to the manual and hydraulic monitor fire nozzles of OMFN; the calculation method of their main performance characteristics is presented. Conducted experimental studies of the fire nozzles in field conditions allowed to give an unbiased evaluation of OMFN efficiency. **METHODS.** Micromanometric construction of flow rate diagrams is used to optimize the OMFN flow part. Performance indicators of existing and newly developed nozzles are compared by the method of field tests. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The study results have shown that OMFN have the greatest rate of the foam spray and feed the air-filled mechanical foam of average expansion ratio at the distance of 40–45 m. It is 10 m farther than the range of existing fire nozzles. Moreover, the foam produced by existing nozzles has low expansion resulting in low extinguishing capability. **CONCLUSIONS.** As compared with existing fire nozzles, the OMFN feature higher performances that proves the feasibility of their practical use.

¹Осипов Артур Геннадьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и стандартизации в машиностроении, e-mail: arthur.osipov@rambler.ru

Artur G. Osipov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering, e-mail: arthur.osipov@rambler.ru



Keywords: open fires, fire-extinguishing tools, manual fire nozzles, hydraulic monitor fire nozzles, optimization of fire nozzle main performances, extinguishing efficiency

Information about the article. Received January 19, 2018; accepted for publication February 12, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Osipov A.G. Theoretical computation and practical studies of the Osipovs' multi-purpose fire nozzles. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 44–54. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-44-54

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется совершенствованию технических средств борьбы с открытыми пожарами, наносящими в масштабе страны большой материальный и социальный ущерб [1–6].

Универсальные пожарные стволы Осиповых (УПСО) в ручном и лафетном исполнении относятся к основным техническим средствам, широко применяемым при тушении открытых пожаров [7–10]. Наиболее часто УПСО используются для подачи огнетушащих веществ при тушении крупногабаритного технологического оборудования, резервуаров с нефтепродуктами, разливов последних, наземных, водных и воздушных транспортных средств, штабелей леса [11] и других горючих материалов. Возможно также применение УПСО в технологических процессах, требующих воздействия (размывания, увлажнения) водой или изоляции пеной различных материалов и веществ. В связи с широким диапазоном практического применения УПСО их дальнейшее совершенствование представляется целесообразным [12, 13].

Целью настоящих исследований является повышение эффективности и безопасности работы УПСО при тушении открытых пожаров.

Поскольку основные технические показатели УПСО, включающие производительность, дальность и пенообразующую способность, главным образом зависят от конструкции проточной части ствола, автором проведены расчетно-теоретические исследования геометрии внутреннего профиля рассматриваемых стволов [14].

При проведении исследований геометрии внутреннего профиля УПСО ис-

пользовано микроанометрическое построение эпюр скоростей потока с помощью прибора типа ММН. Сравнительная оценка технических показателей существующих и разработанных стволов проведена методом полигонных испытаний на базе пожарной спасательной части № 5 ГУ МЧС России по Иркутской области.

На первом этапе исследований для увеличения производительности УПСО осуществлена оптимизация внутреннего профиля его проточной части за счет выполнения его эжектирующего элемента не в виде вакуумной камеры, а в форме проточного конфузочно-диффузорного патрубка с определенными геометрическими параметрами (защищены патентом Российской Федерации № 2111782 [7]).

Определение геометрии проточной части УПСО, эжектирующий элемент которого имеет конфигурацию конфузочно-диффузионного патрубка, проведено в следующей последовательности [14].

Сначала, исходя из принятой производительности, по предложенной эмпирической зависимости определен диаметр горловины конфузочно-диффузорного патрубка эжектирующего элемента ствола:

$$D_{\text{ГОРЛ}} = 6,35\sqrt{Q},$$

где $D_{\text{ГОРЛ}}$ – диаметр горловины конфузочно-диффузорного патрубка, мм; Q – принятая производительность ствола, л·с⁻¹.

По полученным значениям диаметра горловины задана длина конфузочной $L_{\text{КОНФ}}$ и диффузорной $L_{\text{ДИФ}}$ части патрубка с учетом рекомендованных оптимальных соотношений [7]:



$$L_{\text{конф.}} = 1,5...2D_{\text{горл.}};$$

$$L_{\text{диф.}} = 4,5...6D_{\text{горл.}}.$$

Общая длина конфузорно-диффузорного патрубка определена суммированием полученных длин его конфузорной и диффузорной частей:

$$L_{\text{патрубка}} = L_{\text{конф.}} + L_{\text{диф.}}$$

Геометрические параметры остальных конструктивных элементов рассчитываемого УПСО (корпуса, формирующей трубы и т.д.) приняты по ближайшему прототипу воздушно-пенного ствола.

Дальнобойность УПСО зависит от диаметра горловины конфузорно-диффузорного патрубка, напора на стволе, угла его атаки, а также плотности подаваемого огнетушащего вещества.

При напоре на стволе 1 МПа и угле атаки 30° дальность полета пенной струи по периферийным каплям может быть определена, в первом приближении, по предложенной эмпирической зависимости:

$$L = 0,93 \cdot D_{\text{горл.}}$$

где L – дальность полета пенной струи по периферийным каплям, м; $D_{\text{горл.}}$ – диаметр горловины конфузорно-диффузорного патрубка, мм.

Изменение напора в нагнетательной

рукавной линии на 0,1 МПа в сторону увеличения приводит к приращению дальности ствола в среднем на 3 м. При снижении напора соответственно происходит уменьшение дальности УПСО.

При изменении угла атаки УПСО его дальность корректировалась с помощью поправочного коэффициента k (табл. 1).

В связи с пониженной плотностью воздушно-механической пены дальность полета ее струи на практике меньше водяной на 5–7 м.

Наряду с рассмотренными техническими показателями УПСО важное значение, с точки зрения эффективности тушения пожаров, имеет качество генерируемой им пены, в первую очередь, кратность последней.

Поэтому для качественного пенообразования и повышения кратности пены в случае работы ствола на водном растворе пенообразователя, заранее приготовленном в стационарном пеносмесителе пожарного насоса, предлагается в горловину конфузорно-диффузорного патрубка УПСО эжектировать воздух. При этом расход воздуха через штуцер патрубка должен составлять не менее 13% от номинального расхода ствола. Исходя из этого внутренний диаметр штуцера для подачи воздуха в горловину конфузорно-диффузорного патрубка УПСО будет равен:

$$d_{\text{штуцера}} = 6,35 \cdot \sqrt{13 \cdot (Q/100)}.$$

Таблица 1

Значения поправочного коэффициента

Table 1

Values of the correction factor

Угол атаки, град. / Angle of attack, degrees	15	20	25	30	35	40	50	60
Коэффициент k / Factor k	1,18	1,10	1,05	1,0	0,95	0,92	0,88	0,85



Штатные воздушные отверстия на формирующей трубе ствола позволяют традиционным струйным способом получать из водного раствора пенообразователя пену низкой кратности – порядка 10 единиц. Однако в УПСО эжектируемый воздух, предварительно поступающий через штуцер в горловину конфузорно-диффузорного патрубка или специальные щелевые воздушные каналы на выходе патрубка, интенсифицирует процесс образования пены и повышает ее кратность.

Для доведения кратности воздушно-механической пены до средних значений, характерных для современных генераторов пены средней кратности (ГПС), рекомендуется на конце формирующей трубы УПСО устанавливать струйный пеногенератор.

Таким образом, трехступенчатое дробление воздушными струями потока рабочего раствора позволяет довести кратность воздушно-механической пены на выходе из УПСО, в зависимости от режима его работы, до 40–60 единиц.

Площадь тушения пожара УПСО может быть определена, в первом приближении, по следующей предлагаемой эмпирической зависимости [14]:

$$S = 0,89^{-2} \cdot D_{горл.}^2,$$

где S – площадь тушения пожара, m^2 ; $D_{горл.}$ – диаметр горловины конфузорно-диффузорного патрубка, мм.

В результате расчетов, проведенных с целью интенсификации подачи огнетушащих веществ и сокращения продолжительности тушения пожара, производительность УПСО по воде повышена до $105 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$, при этом дальность формирования пенной струи доведена до 70 м. Организация работы такого высокопроизводительного ствола возможна от одной насосной станции производительностью более $100 \text{ л} \cdot \text{с}^{-1}$, например, от станции ПНС-110 отечественного производства.

Универсальный пожарный ствол с такими высокими показателями, на наш взгляд, целесообразно устанавливать стационарно на коленчатые автоподъемники,

автолестницы, автокраны и другие грузоподъемные машины и с успехом использовать для тушения резервуаров с нефтепродуктами, крупногабаритного технологического оборудования, высотных зданий и сооружений.

Для обоснования возможности стационарной установки высокопроизводительного УПСО на верхнем колене коленчатого подъемника или другой грузоподъемной машины проведена проверка поперечной устойчивости подъемника на опрокидывающий момент, создаваемый реакцией формируемой стволом струи [15]. При этом для УПСО с различными геометрическими размерами проходного сечения были определены реакции формируемых струй по формуле [14]:

$$R = 2 \cdot s \cdot P,$$

где R – величина реакции формируемой стволом струи, Н; s – площадь горловины конфузорно-диффузорного патрубка, m^2 ; P – рабочее давление на стволе, Па.

Зависимость значений реакций формируемых струй от рабочего давления в напорной линии представлена на рис. 1.

На рис. 1 видно, что при увеличении рабочего давления в напорной линии и диаметра горловины конфузорно-диффузорного патрубка УПСО значения реакций формируемых струй существенно увеличиваются, и, следовательно, возрастает опрокидывающий момент. Поэтому стационарная установка УПСО с диаметром горловины патрубка более 60 мм на коленчатый подъемник нецелесообразна из соображений обеспечения устойчивости грузоподъемной машины при работе ствола.

Расчетная схема поперечной устойчивости коленчатого подъемника при работе стационарного УПСО показана на рис. 2.

Зная максимальное плечо действия реакции формируемой струи, равное возможной высоте подъема УПСО (30–60 м), можно определить наибольший опрокидывающий момент $M_{опр.}$, возникающий при работе стационарно установленного на



верхнем колене ствола:

$$M_{OПР.} = R \cdot H,$$

где H – максимальное плечо действия реакции формируемой струи, м.

Удерживающий момент $M_{уд.}$, показанный на рис. 3, определен для шасси КамАЗ-53213 без специальных аутриггеров.

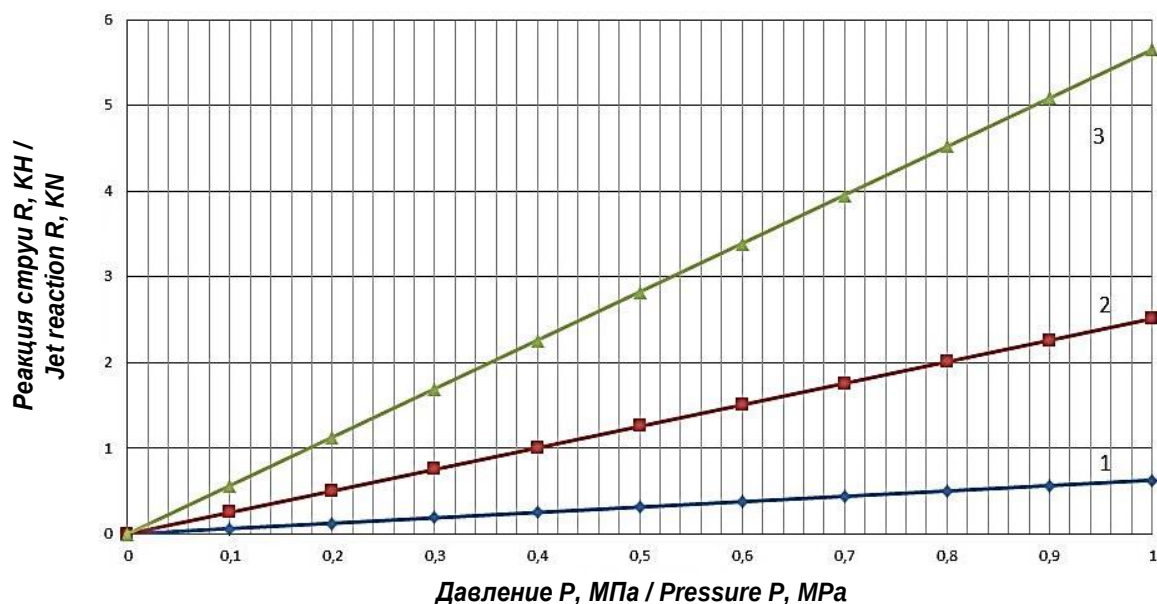


Рис. 1. Изменение значений реакций формируемых струй в зависимости от рабочего давления в напорной линии при диаметре горловины патрубка, мм: 1 – 20; 2 – 40; 3 – 60

Fig. 1. Variation of formed jet reaction values depending on the working pressure in the delivery line when the diameter of the nozzle neck is: 1 – 20 mm; 2 – 40 mm; 3 – 60 mm;

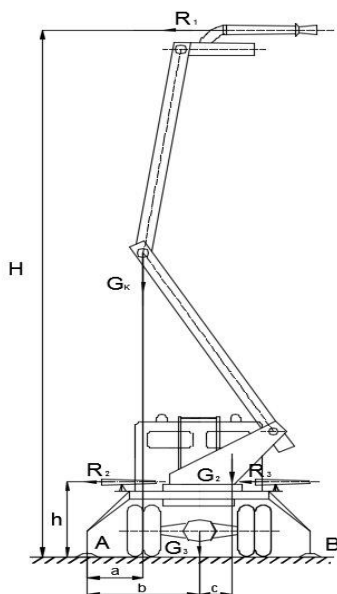


Рис. 2. Расчетная схема поперечной устойчивости коленчатого подъемника при работе стационарного УПСО на верхнем колене

Fig. 2. Calculation model of the roll stability of the articulated boom lift under the operation of a stationary OMFN on the upper ladder

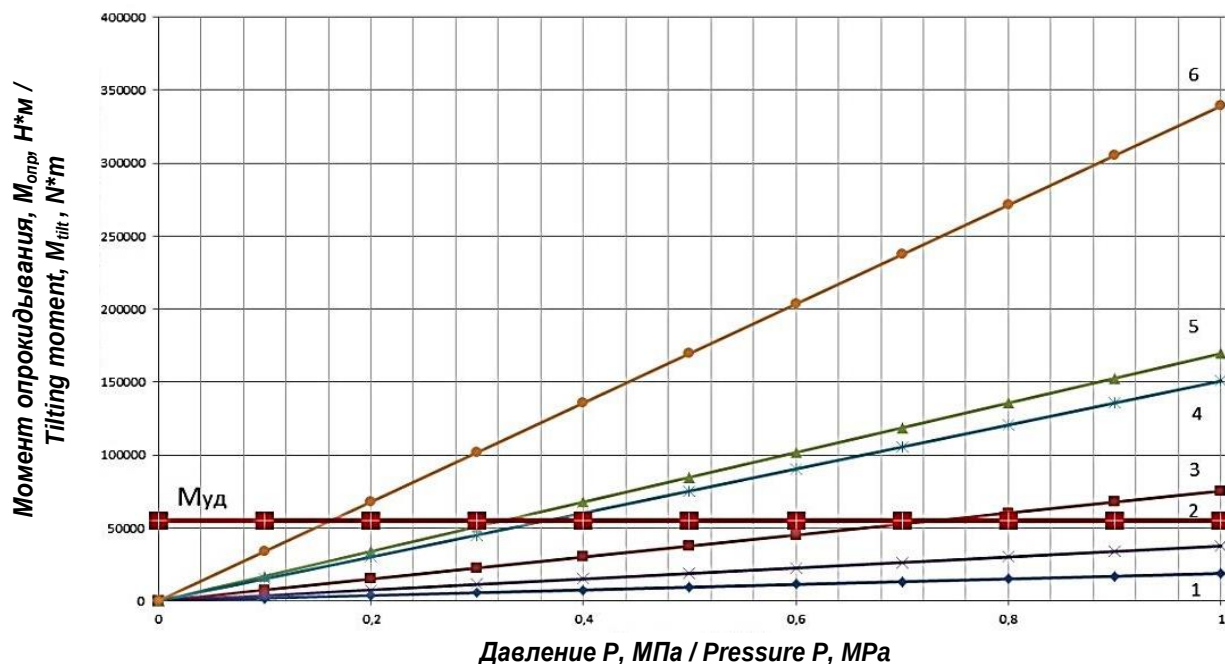


Рис. 3. Зависимость дополнительного опрокидывающего момента от рабочего давления в напорной линии при высоте подъема ствола, м: 1, 3, 5 – 30 м; 2, 4, 6 – 60 м; графики 1 и 2 – для горловины патрубка 20 мм; 3 и 4 – для горловины патрубка 40 мм; 5 и 6 – для горловины конфузорно-диффузорного патрубка 60 мм

Fig. 3. Dependence of the additional tilting moment on the working pressure in the delivery line at the nozzle elevation of, m: 1, 3, 5 – 30 m; 2, 4, 6 – 60 m; diagrams 1 and 2 – for the nozzle neck of 20 mm; 3 and 4 – for the nozzle neck of 40 mm; 5 and 6 – for the convergent-divergent neck of 60 mm

При расчете устойчивости грузоподъемной машины со стационарным УПСО ветровая нагрузка во внимание не принимается, поскольку установка ствола из тактических соображений предусматривается только с наветренной стороны. При таком расположении УПСО сила ветра действует против реакции струи, способствуя снижению величины возникающего дополнительного опрокидывающего момента.

Величина основного и дополнительного опрокидывающего момента должна быть меньше значения удерживающего момента приблизительно в 2 раза. Рекомендуемый коэффициент запаса устойчивости, т.е. отношение удерживающего момента к опрокидывающему, равен 1,16–1,4.

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что во время работы УПСО требуемая поперечная устой-

чивость выбранной грузоподъемной машины обеспечивается не во всех случаях. Продольная устойчивость грузоподъемных машин всегда выше поперечной устойчивости и поэтому в проверке не нуждается.

Наибольшая безопасность манипуляции УПСО достигается при установке коленчатого подъемника кормовой частью к объекту тушения без разворота комплекта колен на 180°, изменении угла наклона нижнего колена в диапазоне 0–45°, а среднего колена по отношению к нижнему – 45–90°, и повороте всех колен в горизонтальной плоскости на 30° в обе стороны.

Для проверки результатов расчетно-теоретических исследований на базе пожарной спасательной части № 5 ГУ МЧС России 29 марта 2017 г. были проведены полигонные испытания УПСО с диаметром конфузорно-диффузорного патрубка 18 мм (рис. 4).



a



b

Рис. 4 . Полигонные испытания универсального пожарного ствола Осиповых:

a – общий вид ствола; b – работа ствола по воздушно-механической пене

Fig. 4 . Field tests of the Osipovs' multi-purpose fire nozzle:

a – OMFN general view; b – MFNO operation using air-filled mechanical foam

Проведенные эксперименты подтвердили результаты расчетно-теоретических исследований и показали, что основные параметры УПСО превосходят аналогичные показатели сопоставимых с ним существующих пожарных стволов [16–19].

Программой испытаний, наряду с проверкой эффективности работы и значений основных показателей УПСО, предусматривалась сравнительная оценка его дальнобойности и существующих пеногенераторов, воздушно-пенных пожарных стволов и их различных комбинаций.

Проведенная сравнительная оценка дальнобойности пенных струй, формируемых различными пеногенераторами и воздушно-пенными пожарными стволами, позволяет констатировать, что наибольшей дальнобойностью пенной струи обладает УПСО, подающий воздушно-механическую пену средней кратности на расстояние 40–45 м (рис. 4, b). Дальнобойность ближайшего по конструкции к УПСО прототипа – воздушно-пенного пожарного ствола СВП-8, составляет только 30–35 м. При этом приготавливаемая этим стволом воздушно-механическая пена имеет весьма низкую кратность, не превышающую 10 единиц, и, следовательно, незначительную огнетушащую способность.

При наложении струи пены средней кратности, получаемой в современных пеногенераторах ГПС-200, 600 или 2000, на струю воздушно-механической пены низкой кратности можно существенно повысить кратность пены несущей струи, улучшить ее огнетушащую способность и подать пену на расстояние до 30 м (рис. 5).

Дальнобойность струи пены средней кратности, получаемой в пеногенераторе «Пурга», разработанном в Ленинградском филиале ВНИИПО, составляет 25 м, а во всех остальных пеногенераторах ГПС, практически независимо от их производительности и давления в напорной линии, – не превышает 20 м. Последнее не позволяет тушить пеной крупные объекты без дополнительных пеноподъемников и подвергает ствольщиков большой опасности.

На рис. 5, b видно, что если вместо струи СВП-8 использовать в качестве несущей воздушно-механическую пенную струю УПСО, расположенную справа, дальнобойность комбинированной струи может быть увеличена почти на 10 м и составит порядка 40–45 м.

Сравнительная оценка тактико-технических показателей отечественных и импортных воздушно-пенных стволов представлена в табл. 2.



a



b

Рис. 5. Полигонные испытания дальности пеногенераторов, воздушно-пенных стволов и их комбинаций: а – комбинация пеногенератора ГПС-600 и воздушно-пенного ствола СВП-8; б – дальность комбинированной пенной струи (слева) и воздушно-механической пенной струи УПСО (справа)

Fig. 5. Field tests of the rate of foam generators, air-foam nozzles and their combinations: a – combination of the foam-generator FNG-600 and air-foam nozzle AFN-8; b – rate of combined foam spray (on the left) and air-filled mechanical foam spray MFNO (on the right)

Таблица 2

Тактико-технические характеристики ручных и лафетных пожарных стволов

Table 2

Performance characteristics of manual and hydraulic monitor multi-purpose fire nozzles

Параметр / Parameter	Стволы стандартные отечественные / Domestic standard fire nozzles				Эксперимен- тальные стволы Осиповых / The Osipovs' experimental fire nozzles		Импортные аналоги (Германия) / Foreign analogues (Germany)	
	СВП-4 / SVP-4	СВПЭ-4 / SVPE-4	СВПЭ-8 / SVPE-8	ПЛС-П20 / PLS-P20	УПСО ручной / MFNO hydraulic monitor	УПЛС лафет- ный / MFNO hydraulic monitor	TSPR- 2950FN ручной / manual	TURBO FIGHTER MZ2000 лафетный / hydraulic monitor
Производительность по пене, м ³ /мин / Foam efficiency, m ³ /min	4	4	8	12	24*	54*	7,5	16
Рабочее давление, МПа / Operating pressure, MPa	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6–1,0	0,6–1,0	0,6	0,7
Расход воды, л/с / Water flow, l/s	5-6	7,9	16	19	16	30	15,8	33,3
Кратность пены / Foam expansion ratio	7	7	7	10	25*	30*	8	8
Дальность пенной струи, м / Foam spray rate, m	28	18	20	50	35–40*	55	18	20
Дальность водяной струи, м / Water spray rate, m	–	–	–	60	40*	60	22	40
Габариты, мм / Dimensions, mm:								
длина / Length	706	715	855	1405	450–715	1700	550	750
диаметр (по клямкам ГМ) / Diameter (by)	128	128	142	–	106	–	150	–
ширина / Width	–	–	–	665	–	665	–	–
высота / Height	–	–	–	325	–	325	–	–
Масса, кг / Weight, kg	1,6	2,8	3,8	22	1,0–1,5	23	3,6	9

*Возможно изменение параметра в сторону увеличения / The parameter can be changed upward.



Опытные образцы УПСО в ручном и лафетном исполнении с успехом применяются оперативными подразделениями Государственной противопожарной службы Иркутска, Ангарска, Усть-Кута и Улан-Удэ при тушении пожароопасных объектов, в том числе предприятий по переработке и

хранению нефти.

Более широкое внедрение УПСО в практику пожаротушения сдерживается в связи с отсутствием в настоящее время промышленной базы для серийного производства разработанного пожарного оборудования.

Заключение

Результаты практических исследований УПСО позволяют сделать обоснованный вывод о том, что стволы Осиповых в ручном и лафетном исполнении имеют неоспоримые преимущества по сравнению с существующими водопенными стволами

и могут с успехом использоваться на практике при тушении открытых крупных пожаров в качестве самостоятельных технических единиц, а также в комбинации с другим пожарным оборудованием.

Библиографический список

1. Петрович А. История борьбы с пожарами в России [Электронный ресурс] // Fire-truck.ru. Пожарные машины. Энциклопедия пожарной техники и оборудования. URL: <http://fire-truck.ru/istoriya-encyclopedia/istoriya-borbyi-s-pozharami-v-rossii.html> (03.02.2018).
2. Кудрин А.Ю., Подрезов Ю.В. Анализ современных средств и способов борьбы с природными пожарами // Технологии гражданской безопасности. 2006. № 4. С. 27–32.
3. Калашникова Т.В. Пожары при добыче нефти и газа. // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. № 1-1. С. 66–69.
4. BETE Fire Protection Nozzle Experience [Электронный ресурс]. URL: http://spray-expert.ru/pdf/BETE_FireProtection-marked.pdf (03.02.2018).
5. Avsec R. 5 things firefighters must know about nozzles // FireRescue1. URL: <https://www.firerescue1.com/fire-products/water-supply/nozzles/articles/21663018-5-things-firefighters-must-know-about-nozzles/> (03.02.2018).
6. Игнатьев А., Захаров П. Пожарные стволы новых разработок. Мифы и реальность. [Электронный ресурс] // Fireman.ru Сервер Российской пожарной охраны. URL: <http://www.fireman.ru/talk/viewtopic.php?t=4440&sid=501ce834ef72042d9767d272b641d316> (03.02.2018).
7. Пат. № 2111782, Российская Федерация, МПК 6A62C31/02, 31/12. Пожарный ствол Осиповых / Г.И. Осипов, А.Г. Осипов, А.В. Осипова. № 97102129/12; заявл. 11.02.1997, опубл. 27.05.1998. Бюл. № 15.
8. Осипов А.Г., Горнов Ю.Н. Совершенствование конструкции ручных универсальных пожарных стволов // Вестник ИрГТУ. 2013. № 4 (75). С. 66–70.
9. Осипов А.Г., Зубаков С.Е. Стадии проектирования конструкций универсальных пожарных стволов //

- Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 11–12 апреля 2013 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. С. 422–425.
10. Осипов А.Г., Станишевская К.В., Шульга М.А. Модернизация универсальных пожарных стволов // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. II Всероссийской науч.-практ. конф., приуроченной ко Дню космонавтики (Иркутск, 11–13 апреля 2012 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. С. 103–106.
11. Осипов А.Г., Горнов Ю.Н., Королев П.В. Универсальные пожарные стволы для тушения объектов лесопромышленного комплекса Иркутской области // Вестник ИрГТУ. 2010. № 6 (46). С. 48–52.
12. Осипов А.Г., Филиппова Г.А. Изготовление опытных образцов пожарных стволов // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. III Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 11–13 апреля 2013 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. С. 410–414.
13. Осипов А.Г., Багаутдинов М.Р. Улучшение эргономических показателей ручных универсальных пожарных стволов // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. Всерос. молодежной науч.-практ. конф. (Иркутск, 11 ноября 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 242–245.
14. Осипов А.Г. Улучшение эксплуатационных свойств пожарного автомобиля в низкотемпературных условиях: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 101 с.
15. Осипов А.Г., Брижатюк Д.С. Стационарная установка универсальных пожарных стволов Осиповых на грузоподъемных машинах // Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сб. ст. IX Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 12–15 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. С. 449–454.
16. Ручной универсальный пожарный ствол THUNDERFOG-RU (ТАНДЕРФОГ-РУ). Описание и ТТХ [Электронный ресурс] // Fireman.Club. Клуб пожарных спасателей. URL: <https://fireman.club/statyi->



polzovateley/ruchnoy-universalnyiy-pozharnyy-stvol-thunderfog-ru-tanderfog-ru-tth/ (03.02.2018).

17. Пожарные стволы: технические характеристики. Стволы пожарные ручные и их назначение [Электронный ресурс]. URL:

<http://fb.ru/article/232371/pojarnye-stvoliyi-tehnicheskie-harakteristiki-stvoliyi-pojarnye-ruchnye-i-ih-naznachenie> (03.02.2018).

18. Технические характеристики универсальных

ручных пожарных стволов [Электронный ресурс] // StudFiles. Файловый архив студентов. URL:

<https://studfiles.net/preview/6459542/page:3/> (03.03.2018).

19. UNDERSTANDING FIRE NOZZLE DESIGN [Электронный ресурс]. URL:

<http://www.tft.com/literature/library/files/lft-010.pdf> (03.02.2018).

References

1. Petrovich A. *Istoriya bor'by s pozharami v Rossii* [History of firefighting in Russia]. *Fire-truck.ru. Pozharnye mashiny. Entsiklopediya pozharnoi tekhniki i oborudovaniya* [Fire trucks. Encyclopedia of fire equipment]. Available at: <http://fire-truck.ru/istoriya-encyclopedia/istoriya-borbyi-s-pozharami-v-rossii.html> (accessed 3 February 2018).

2. Kudrin A.Yu., Podrezov Yu.V. Analysis of modern means and methods of wildfire fighting. *Tekhnologii grazhdanskoi bezopasnosti* [Civil Security Technology]. 2006, no. 4, pp. 27–32. (In Russian)

3. Kalashnikova T.V. Fires under oil and gas extraction. *Aktual'nye problemy gumanitarnykh i estestvennykh nauk* [Actual problems of humanities and natural sciences]. 2017, no. 1-1, pp. 66–69. (In Russian).

4. BETE Fire Protection Nozzle Experience. Available at: http://spray-expert.ru/pdf/BETE_FireProtection-marked.pdf (accessed 3 February 2018).

5. Avsec R. 5 things firefighters must know about nozzles / FireRescue1. Available at:

<https://www.firerescue1.com/fire-products/water-supply/nozzles/articles/21663018-5-things-firefighters-must-know-about-nozzles/> (accessed 3 February 2018).

6. Ignat'ev A., Zakharov P. *Pozharnye stvolы novykh razrabotok. Mify i real'nost'* [Fire nozzles of new developments. Myths and reality]. *Fireman.ru Server Rossiiskoi pozharnoi okhrany* [Fireman.ru. Server of the Russian fire protection service]. Available at: <http://www.fireman.ru/talk/viewtopic.php?t=4440&sid=501ce834ef72042d9767d272b641d316> (accessed 3 February 2018).

7. Osipov G.I., Osipov A.G., Osipova A.V. *Pozharnyy stvol Osipovykh* [The Osipovs' firefighting hose]. Patent RF, no. 97102129/12, 1998.

8. Osipov A.G., Gornov Yu.N. Improving manual multi-purpose fire hose design. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2013, no. 4 (75), pp. 66–70. (In Russian).

9. Osipov A.G., Zubakov S.E. *Stadii proektirovaniya konstruksii universal'nykh pozharnykh stvolov* [Designing stages of multi-purpose fire nozzles]. *Sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collection of articles of III All-Russia Scientific and Practical Conference "Aircraft and Mechanical Engineering and Transport of Siberia"]. Irkutsk: Irkutsk state technical university Publ., 2013, pp. 422–425. (In Russian).

10. Osipov A.G., Stanishevskaya K.V., Shul'ga M.A.

Modernizatsiya universal'nykh pozharnykh stvolov [Modernization of multi-purpose fire hoses]. *Sbornik statei II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri, priurochennoi ko Dnyu kosmonavtiki* [Collection of articles of II All-Russia Scientific and Practical Conference "Aircraft and Mechanical Engineering and Transport of Siberia" dedicated to the Cosmonautics day]. Irkutsk: Irkutsk state technical university Publ., 2012, pp. 103–106. (In Russian).

11. Osipov A.G., Gornov Yu.N., Korolev P.V. Universal fire-hoses to extinguish the facilities of timber complex in Irkutsk region. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2010, no. 6 (46), pp. 48–52. (In Russian).

12. Osipov A.G., Filippova G.A. *Izgotovlenie opytnykh obraztsov pozharnykh stvolov* [Production of fire-hose nozzle prototypes]. *Sbornik statei III Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collection of articles of III All-Russia Scientific and Practical Conference "Aircraft and Mechanical Engineering and Transport of Siberia"]. Irkutsk: Irkutsk state technical university Publ., 2013, pp. 410–414. (In Russian).

13. Osipov A.G., Bagautdinov M.R. *Uluchshenie ergonomicheskikh pokazatelei ruchnykh universal'nykh pozharnykh stvolov* [Improving ergonomic characteristics of manual multi-purpose fire hose nozzles]. *Sbornik statei Vserossiiskoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collection of articles of All-Russia Youth Scientific and Practical Conference "Aircraft and Mechanical Engineering and Transport of Siberia"]. Irkutsk: Irkutsk state technical university Publ., 2016, pp. 242–245. (In Russian).

14. Osipov A.G. *Uluchshenie ekspluatatsionnykh svoystv pozharnogo avtomobilya v nizkotemperaturnykh usloviyakh* [Improving fire truck performance in low-temperature conditions]. Irkutsk: Irkutsk state technical university Publ., 2004, 101 p. (In Russian).

15. Osipov A.G., Brizhatyuk D.S. *Statsionarnaya ustanovka universal'nykh pozharnykh stvolov Osipovykh na gruzopod'emnykh mashinakh* [Stationary installation of the Osipovs' multi-purpose fire hoses on load-lifting machines]. *Sbornik statei IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Collection of articles of IX All-Russia Scientific and Practical Conference "Aircraft



and Mechanical Engineering and Transport of Siberia”]. Irkutsk: Irkutsk state technical university Publ., 2017, pp. 449–454. (In Russian).

16. *Ruchnoi universal'nyi pozharnyi stvol THUNDER-FOG-RU. Opisanie i TTKh* [Manual multi-purpose fire nozzle of THUNDERFOG-RU design. Description and characteristics]. Available at: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/ruchnoy-universalnyiy-pozharnyy-stvol-thunderfog-ru-tanderfog-ru-tth/> (accessed 3 February 2018).

17. *Pozharnye stvolы: tekhnicheskie kharakteristiki. Stvolы pozharnye ruchnye i ikh naznachenie* [Fire hose nozzles: specifications. Manual fire nozzles and their

purpose]. Available at:

<http://fb.ru/article/232371/pojarnye-stvolyi-tehnicheskie-kharakteristiki-stvolyi-pojarnye-ruchnye-i-ih-naznachenie> (accessed 3 February 2018).

18. *Tekhnicheskie kharakteristiki universal'nykh ruchnykh pozharnykh stvolov* [Technical characteristics of multi-purpose manual fire nozzles]. Available at: <https://studfiles.net/preview/6459542/page:3/> (accessed 3 February 2018).

19. UNDERSTANDING FIRE NOZZLE DESIGN. Available at: <http://www.tft.com/literature/library/files/lft-010.pdf> (accessed 3 February 2018).

Критерии авторства

Осипов А.Г. провел расчетно-теоретические исследования универсальных пожарных стволов Осиповых с подтверждением результатов путем проведения полигонных испытаний. Осипов А.Г. несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Osipov A.G. has conducted calculations and theoretical studies of Osipovs' universal firefighting hoses with the confirmation of results in field tests. Osipov A.G. bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.033

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-55-62>

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОЛИНЕЙНОГО ДВИЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО СРЕДСТВА, ОСНАЩЕННОГО РОТОРНО-ВИНТОВЫМ ДВИЖИТЕЛЕМ, ПО ЗАБОЛОЧЕННОЙ МЕСТНОСТИ

© А.Д. Стрижак¹, А.А. Липин², А.В. Вишняков³

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
603155, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ данного исследования – выявить оптимальные конструктивные параметры транспортно-технологического средства (ТТС), оснащенного роторно-винтовым двигателем (РВД), при его прямолинейном движении по заболоченной местности. **МЕТОДЫ.** Для визуализации результатов проведено компьютерное моделирование с помощью программного комплекса Microsoft Visual Studio 2012. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Итогом компьютерного моделирования, осуществленного на основе математического моделирования, является определение максимального значения скорости, V_{max} , при разных значениях угла наклона лопасти РВД.

ВЫВОДЫ. Полученные значения скоростей, представленные графически, показывают, что для всех случаев движения ТТС с РВД по заболоченному грунту максимальное значение скорости V_{max} достигается при угле наклона винтовой линии 60° . Установлено, что при изменении угла наклона винтовой лопасти по сравнению с базовым углом наклона в 30° происходит увеличение V_{max} в 2,68 раза.

Ключевые слова: транспортно-технологическое средство, роторно-винтовой двигатель, компьютерное моделирование, угол наклона винтовой лопасти.

Информация о статье. Дата поступления 11 декабря 2017 г.; дата принятия к печати 26 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Стрижак А.Д., Липин А.А., Вишняков А.В. Исследование прямолинейного движения транспортно-технологического средства, оснащенного роторно-винтовым двигателем, по заболоченной местности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 55–62. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-55-62

RESEARCH OF STRAIGHT-LINE MOTION OF A TRANSPORT-TECHNOLOGICAL VEHICLE EQUIPPED WITH A ROTARY SCREW PROPELLER ON WETLANDS

A.D. Strizhak, A.A. Lipin, A.V. Vishnyakov

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
24, Minin St., Nizhny Novgorod, 603155, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of this study is to identify the optimal design parameters of a vehicle equipped with a rotary screw propulsion unit under its rectilinear movement in wetlands. **METHODS.** A computer modeling has been conducted using Microsoft Visual Studio 2012 software to visualize the results. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The result of the mathematical modeling-based computer simulation is the determination of the maximum speed value V_{max} under different values of the pitch angle of the rotary screw propeller blade. **CONCLUSIONS.** The obtained values of speeds presented on a graph show that the maximum value of speed V_{max} is achieved at the pitch angle of 60° of the circular helix for all cases of rotary screw propeller vehicle movement on wetlands. It is determined that the 30° change in the pitch angle of the helical blade as compared with the basic pitch angle causes 2.68 time increase in V_{max} .

Keywords: transport technological vehicle, rotary screw propulsion unit, computer modeling, pitch angle of the helical blade

¹Стрижак Аркадий Дмитриевич, аспирант, e-mail: strizh-ark@yandex.ru
Arkadiy D. Strizhak, Postgraduate, e-mail: strizh-ark@yandex.ru

²Липин Алексей Александрович, аспирант, e-mail: lisenaks@gmail.com
Aleksey A. Lipin, Postgraduate, e-mail: lisenaks@gmail.com

³Вишняков Анатолий Владимирович, аспирант, e-mail: tolik.vishnyakov@gmail.com
Anatoliy V. Vishnyakov, Postgraduate, e-mail: tolik.vishnyakov@gmail.com



Information about the article. Received December 11, 2017; accepted for publication February 26, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Strizhak A.D., Lipin A.A., Vishnyakov A.V. Research of straight-line motion of a transport-technological vehicle equipped with a rotary screw propeller on wetlands. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 55–62. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-55-62

Введение

В настоящее время во многих странах активно ведутся работы по созданию новых транспортно-технологических средств (ТТС) и мобильных робототехнических комплексов. Одним из важнейших направлений в данной области являются исследования по улучшению проходимости подобных систем, то есть их способности безостановочно и эффективно передвигаться по различным типам грунтов.

Следует заметить, что большинство существующих комплексов предназначено, в первую очередь, для работы в условиях города и на относительно прочных основаниях. Но не следует забывать, что в России на заболоченные территории приходится около 10% всей площади страны или 1,4 млн км². При этом основным сдерживающим фактором развития данных территорий, наряду с суровым климатом и большой разбросанностью населенных пунктов, является почти полное отсутствие коммуникаций. Это существенным образом сказывается на осуществлении транспортных операций, а также при нефте- и газодобыче, промышленном и дорожном строительстве, устранении чрезвычайных ситуаций, особенно это относится к эксплуатации ТТС в летний период.

В этих условиях для обеспечения хозяйственной деятельности и решения оборонных задач особое внимание уделяется внедорожным транспортным средствам высокой проходимости, одним из которых является ТТС, оснащенное роторно-винтовым движителем (РВД).

Необходимо учесть, что изучение движения любого транспортного средства,

а тем более его моделирование, имеет смысл только в совокупности с моделью конкретного грунтового основания.

Фундаментальными в теории движения являются труды Н.А. Забавникова, В.Ф. Платонова, посвященные особенностям прямолинейного равномерного и неравномерного и криволинейного движения машин с гусеничным движителем, работы Г.А. Смирнова и Н.Ф. Бочарова, в которых рассматривается движение колесных машин. В работах А.А. Крживицкого представлены результаты исследования движения снегохода, оснащенного роторно-винтовым шасси. Б.Н. Коула изучал возможность использования РВД в качестве универсального средства для передвижения вездеходов-амфибий по суше и воде [1]. Теоретическим и экспериментальным исследованиям роторно-винтовых машин посвящены работы американских ученых Дж. Гордона, Х. Дугоффа, М. Беккера и Р. Эрлиха. М. Беккером разработана общая теория передвижения транспортных средств по бездорожью. А. Солтыным исследованы затраты мощности маломасштабной модели шнекового тягача при движении по песчаному и болотистому грунтам, а также при преодолении водных препятствий. Методы расчета, выбора геометрических параметров, мощностных характеристик транспортно-технологических машин, а также теория «машина – местность» и др. отражены в работах Джона Фриберга, Кюнпо Лью, Кенджи Нагаока, Такаши Кубото, Н.Ф. Кошарного, А.П. Куляшова⁴, С.В. Рукавишникова, В.И. Вологодина, В.И. Захаренкова, В.И. Гавага, Р.А. Хабут-

⁴Куляшов А.П. Специальные строительно-дорожные машины с роторно-винтовым движителем: дис. ... д-ра техн. наук. Горький, 1986. 327 с. / Kulyashov A.P. Special road construction machinery with rotary screw propulsion: Doctor's Dissertation in technical sciences. Gorky, 1986, 327 p.



динова, М.М. Танклевского, А.Ф. Николаева, Ю.П. Адясова, В.Н. Колотилина, Л.С. Левшунова, В.А. Шапкина⁵, У.Ш. Вахидова, А.А. Кошуриной, Ю.И. Молева, Ю.В. Щербакова⁶, Т.В. Водопьянова, С.В. Доровских и других [2–5].

Цель данного исследования – выявить оптимальные конструктивные параметры РВД и дать дальнейшие рекомендации, помогающие увеличить максимальную скорость движения ТТС по заболоченной местности.

Методика компьютерного моделирования прямолинейного движения ТТС с РВД по заболоченной местности

В большинстве работ по моделированию движения роторно-винтовых машин используются обобщенные математические модели движения ТТС с РВД, предназначенные для анализа большинства основных типов установившегося движения, режимов разгона, торможения и поворота [6].

Авторами настоящей работы исследуется прямолинейное движение ТТС с РВД по болотистому грунту путем компьютерного моделирования с визуализацией результатов. При этом принято следующее упрощение: движение транспортно-технологического средства, оснащенного РВД, рассматривается в двумерной плоскости ОХУ. В этом случае анализ непосредственно прямолинейного движения, разгона и торможения ТТС с РВД проводится на основе решения уравнения⁴

$$\ddot{x} = m^{-1} [\sum_{i=1}^N (P_{\phi x_i} + P_{F x_i}) + \dot{\phi} \dot{y}], \quad (1)$$

где $P_{\phi x_i}$ – проекции силы взаимодействия грунта и РВД на ось ОХ; $P_{F x_i}$ – проекции силы сопротивления движению ТТС с РВД на ось ОХ; m – масса ТТС; $\dot{\phi}$ – скорость поворота; $\dot{y}$ – скорость бокового увода.

При этом даже для нахождения только скорости равномерного прямоли-

нейного движения необходимо выполнить большое число вычислений с аппроксимацией экспоненциальных зависимостей силы тяги с последующим представлением и решением основного дифференциального уравнения в виде трехчлена с громоздкими коэффициентами, являющимися функциями параметров механических свойств грунта, конструкции ТТС с РВД и его нагрузочного режима (внешних сил).

Для облегчения процесса моделирования прямолинейного движения был разработан программный комплекс с графическим интерфейсом пользователя в Microsoft Visual Studio 2012 на объектно-ориентированном языке программирования C#. Данная программа использует основные формулы из методики вычисления по Н.Ф. Кошарному [7] и позволяет значительно облегчить процесс моделирования прямолинейного движения ТТС с РВД. При компьютерном моделировании были приняты следующие допущения:

- движение всех роторов ТТС осуществляется по грунтам с одинаковыми характеристиками;
- синхронизация вращения роторов происходит с одинаковой скоростью;
- нагрузка на шнеки распределяется равномерно.

Заметим, что данные допущения

⁵Шапкин В.А. Основы теории движения машин с роторно-винтовым движителем по заснеженной местности: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03. Н. Новгород, 2001. 390 с. / Shapkin V.A. Fundamentals of the motion theory of machines with a rotary screw propulsion on snow-covered terrain: Doctor's Dissertation in technical sciences: 05.05.03. N. Novgorod, 2001, 390 p.

⁶Щербаков Ю.В. Разработка методики расчета и выбор рациональных параметров движения подводного транспортно-технологического средства с роторно-винтовым движителем: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03. Н. Новгород, 2000. 167 с. / Shcherbakov Yu.V. Development of calculation methods and selection of rational motion parameters of an underwater transport-technological facility with a rotary screw propeller: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.05.03. N. Novgorod, 2000, 167 p.



возможны, так как применены для моделирования прямолинейного движения. Следовательно, в данном случае можно считать, что величины основных кинематических параметров машины равны соответствующим величинам отдельно взятых РВД. Стоит отметить, что при несоблюдении хотя бы одного из данных допущений будет возникать разворачивающий момент, который в свою очередь приведет к развороту ТТС [3].

Кроме уравнения (1) использовались следующие зависимости теоретической скорости V_t и величины буксования S :

$$V_t = r_0 \tan \varphi \omega; S = 1 - \frac{V}{V_t}, \quad (2)$$

где V_t – теоретическая скорость; r_0 – радиус

РВД по средней линии лопасти; ω – угловая скорость вращения роторов; S – абсолютный сдвиг.

Разработанный программный комплекс позволяет задавать угловые скорости вращения роторов в виде зависимостей $\omega(t)$, благодаря чему в дальнейшем можно рассчитать теоретическую скорость для разных случаев разгона и торможения ТТС с РВД и получить результаты расчета всех параметров движения в виде наглядных графических зависимостей [8, 9].

Результаты моделирования разгона ТТС с РВД по заболоченной местности графически представлены на рис. 1, графики построены при плотности грунта $\rho_r = 1,4 \text{ г/см}^3$.

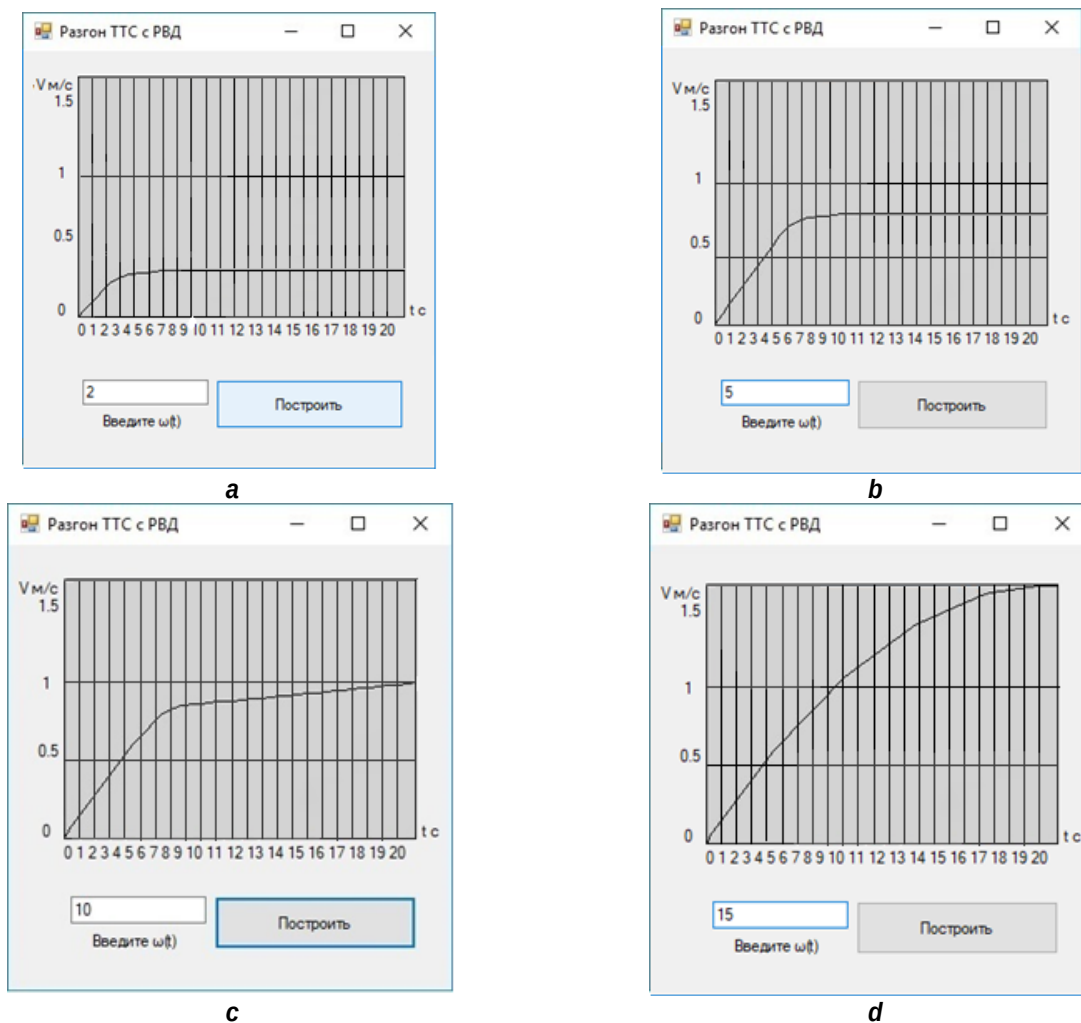


Рис. 1. Разгон ТТС с РВД при плотности грунта $\rho_r = 1,4 \text{ г/см}^3$: а – $\omega(t) = 2$; б – $\omega(t) = 5$; в – $\omega(t) = 10$; д – $\omega(t) = 15$

Fig. 1. Acceleration of vehicles with rotary screw propulsion at the soil density of $\rho_r = 1,4 \text{ г/см}^3$: а – $\omega(t) = 2$; б – $\omega(t) = 5$; в – $\omega(t) = 10$; д – $\omega(t) = 15$



Стоит отметить, что моделирование болотистого грунта является достаточно трудоемкой задачей ввиду неоднородности структуры рассматриваемой среды. Поэтому при разработке компьютерной модели были приняты усредненные параметры в соответствии со строительными нормами, изложенными в СНиП 2.02.01-83⁷.

При помощи системы автоматизированного проектирования SolidWorks проведено исследование влияния геометрических параметров РВД на скоростные параметры РВД при прямолинейном равномерном движении ТТС с условием возможности дискретного изменения угла наклона винтовой лопасти β (рис. 2). В процессе моделирования изменение угла наклона β проводилось непрерывно в диапазоне от 3 до 60° с шагом в 3°. Б. Коул рекомендовал

угол наклона винтовой лопасти брать равным 30°, нами данное значение угла будет рассматриваться в качестве базового [10].

Результаты численного моделирования изменения угла представлены в таблице и на рис. 3.

На основании математического моделирования проведено компьютерное моделирование в Microsoft Visual Studio 2012, в результате которого получены значения скорости при движении ТТС с РВД при разных углах наклона лопасти.

При базовом угле наклона лопасти в 30° $V_{max} = 2,68$ м/с. Максимальное значение скорости, представленное на графике (см. рис. 4), достигается при угле наклона лопасти в 60°. При данном угле наклона наблюдаем увеличение скорости движения ТТС в 2,68 раза.

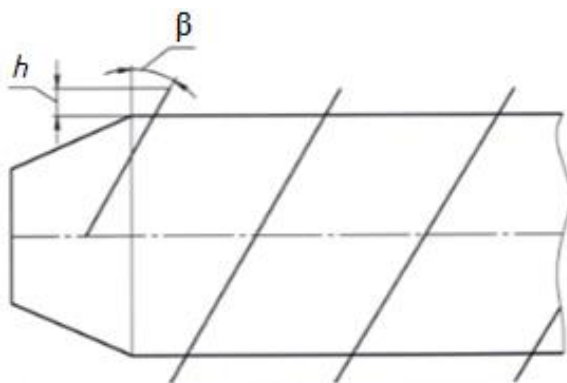


Рис. 2. Основные геометрические параметры ТТС с РВД:
 h – высота лопасти; β – угол наклона лопасти

Fig. 2. Basic geometric parameters of vehicles with rotary screw propulsion:
 h – blade height; β – angle of blade pitch

Изменение высоты лопасти h в соответствии с изменением угла лопасти β
Change in blade height h in accordance with the variation of the blade angle β

Угол наклона β , град. / Angle of pitch β , degrees	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
Высота лопасти h , мм / Blade height h , mm	231	230	228	226	223	220	216	211	206	200
Угол наклона β , град. / Angle of pitch β , degrees	33	36	39	42	45	48	51	54	57	60
Высота лопасти h , мм / Blade height h , mm	194	187	179	172	163	155	145	136	126	115

⁷СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений. М.: Изд-во ФГУП ЦПП, 2006. 48 с. / SNiP 2.02.01-83. Footing of buildings and structures. Moscow: Publishing house FGUP TsPP, 2006, 48 p.

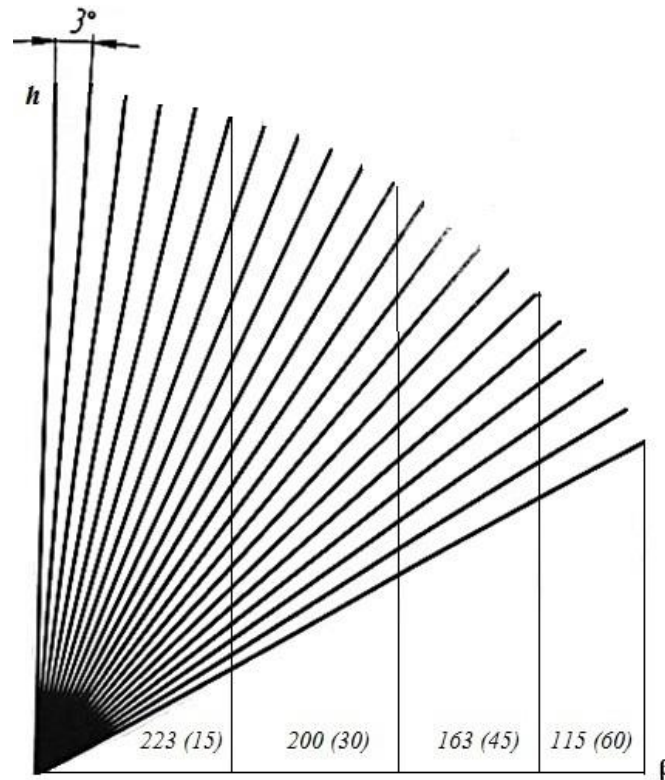


Рис. 3. Изменение высоты лопасти h в соответствии с изменением угла наклона лопасти β в диапазоне от 5 до 60°
Fig. 3. Change in blade height h in accordance with the variation of the angle of blade pitch in the range from 5 to 60°

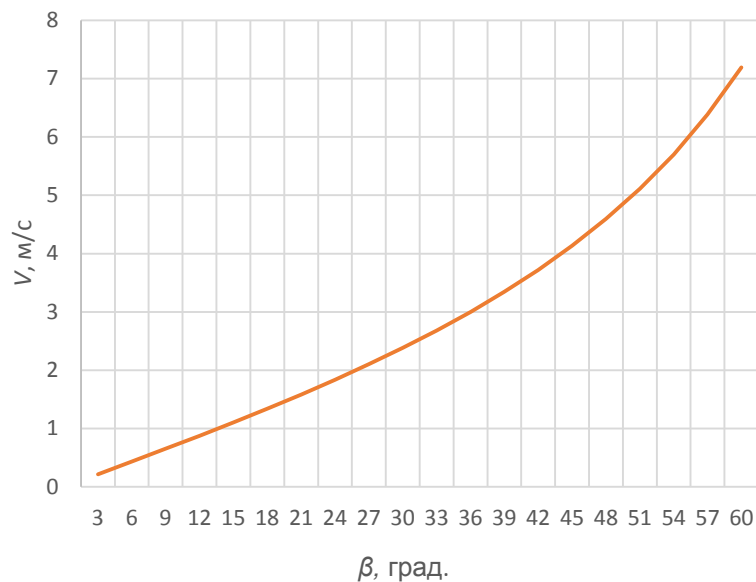


Рис. 4. Зависимость скорости РВД от угла наклона лопасти для заболоченного грунта плотностью 1,4 г/см³
Fig. 4. Dependence of rotary screw propulsion vehicle speed on the blade pitch angle for the wetlands of 1.4 g/sm³ density



Заключение

Разработана компьютерная модель прямолинейного движения ТТС с РВД по заболоченной местности. При проведении расчетного исследования прямолинейного движения роторно-винтового транспортно-технологического средства установлено, что при изменении угла наклона лопасти до 60° (по сравнению с базовым углом накло-

на в 30°) происходит увеличение возможной максимальной скорости V_{max} в среднем в 2,68 раза по сравнению с базовым фиксированным углом наклона. Исходя из полученных результатов, рекомендуем при проектировании ТТС с РВД за основу брать угол наклона винтовой лопасти в 30° .

Библиографический список

1. Cole B.N. Inquiry into amphibious screw traction // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1961. No. 19 (175). С. 919–940.
2. Колотилин В.Е., Михеев А.В., Береснев П.О., Беляев А.М., Папунин А.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В., Куркин А.А. Статистическая модель выбора геометрических параметров, массово-инерционных и мощностных характеристик транспортно-технологических машин на роторно-винтовых движителях // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 3 (110). С. 156–208.
3. Наумов В.Н., Машков К.Ю., Бяков К.Е. Моделирование прямолинейного движения транспортно-технологического средства с роторно-винтовым двигателем // Известия вузов. Серия: Машиностроение. 2013. № 12. С. 31–35.
4. Папунин А.В., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В. О влиянии ландшафта местности на характеристики снежного покрова и на проходимость транспортных средств // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. № 4 (106). С. 331–335.
5. Полотно пути транспортно-технологических машин (справочные материалы к теории «машина – местность»); под общ. ред. В.В. Белякова и А.А. Куркина. Н. Новгород: Изд-во НГТУ, 2014. 447 с.
6. Донато И.О., Жук В.А., Кузнецов Б.В. [и др.]. Роторно-винтовые машины. Основы теории движения. Н. Новгород: ТАЛАН, 2000. 451 с.
7. Кошарный Н.Ф. Техничко-эксплуатационные свойства автомобилей высокой проходимости. Киев: Высшейш. шк., 1981. 208 с.
8. Липин А.А., Стрижак А.Д. Статистический прочностной расчет системы «шнек – грунт» // Наука сегодня: глобальные вызовы и механизмы развития: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Вологда, 26 апреля 2017 г.). В 2 ч. Вологда: Изд-во ООО «Маркер», 2017. Ч. 1. С. 17–19.
9. Липин А.А., Вахидов У.Ш., Вишняков А.В. Стрижак А.Д. Исследование собственных частот колебаний роторно-винтовых движителей // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2017. Т. 20. № 4. С. 3–6.
10. Зубов П.П., Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В., Колотилин В.Е., Куркин А.А. Обзор существующих конструкций сочлененных гусеничных машин и рекомендации по выбору их параметров // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 170–176.

References

1. Cole B.N. Inquiry into amphibious screw traction. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1961, no. 19 (175), pp. 919–940.
2. Kolotilin V.E., Mikheev A.V., Beresnev P.O., Belyaev A.M., Papunin A.V., Makarov V.S., Zezyulin D.V., Belyakov V.V., Kurkin A.A. Statistical model for selection of geometric parameters, mass-inertial and power characteristics of transport-technological machines on rotary screw propulsion. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2015, no. 3 (110), pp. 156–208. (In Russian).
3. Naumov V.N., Mashkov K.Yu., Byakov K.E. Simulation of a straight-line motion of a vehicle with a rotary-screw driver. *Izvestiya vuzov. Seriya: Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Series Machine-Building]. 2013, no. 12, pp. 31–35. (In Russian).
4. Papunin A.V., Makarov V.S., Zezyulin D.V., Belyakov V.V. About influence of topography on characteristics of snow cover and vehicles trafficability. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva* [Proceedings of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2014, no. 4 (106), pp. 331–335. (In Russian).
5. Belyakov V.V. i dr. *Polotno puti transportno-tekhnologicheskikh mashin (spravochnye materialy k teorii "mashina – mestnost")*; pod obshch. red. V.V. Belyakova i A.A. Kurkina. [Roadbed of transport-technological machines (reference materials to the theory of "machine-locality"); under the general editorship of V.V. Belyakov and A.A. Kurkin]. Nizhnii Novgorod: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2014, 447 p. (In Russian).
6. Donato I.O., Zhuk V.A., Kuznetsov B.V. [et alia]. *Rotorno-vintovye mashiny. Osnovy teorii dvizheniya* [Rota-



ry screw machines. Fundamentals of the motion theory]. Nizhnii Novgorod: TALAN Publ., 2000, 451 p. (In Russian).

7. Kosharnyi N.F. *Tekhniko-ekspluatatsionnye svoystva avtomobilei vysokoi prokhodimosti* [Technical and operational properties of cross-country vehicles]. Kiev: Vysheishaya shkola Publ., 1981, 208 p.

8. Lipin A.A., Strizhak A.D. *Statisticheskii prochnostnoi raschet sistemy «shnek – grunt»* [Statistical strength calculation of the “screw – soil” system]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Nauka segodnya: global'nye vyzovy i mekhanizmy razvitiya”* [Materials of the International scientific and practical conference “Science Today: Global Challenges and Development Mechanisms”]. Vologda: Marker

Publ., 2017, part 1, pp. 17–19. (In Russian).

9. Lipin A.A., Vakhidov U.Sh., Vishnyakov A.V., Strizhak A.D. Research of natural frequencies of fluctuations of screw-propelled propulsion. *Vestnik Izhevskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin of Kalashnikov ISTU]. 2017, vol. 20, no. 4, pp. 3–6. (In Russian).

10. Zubov P.P., Makarov V.S., Zezyulin D.V., Belyakov V.V., Kolotilin V.E., Kurkin A.A. Overview of existing structures of articulated tracked vehicles and advice in choosing their parameters. *Trudy NGTU im R.E. Alekseeva* [Proceedings of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University]. 2015, no. 2 (109), pp. 170–176. (In Russian).

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.89+658.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-63-78>

МЕТОДИКА ЭКСПЕРТНОГО ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ЗНАНИЕВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

© В.Л. Аршинский¹, Л.В. Аршинский², Доржсурэн Хишигсурэн³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

²Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

³Институт транспорта,
210535, Монголия, Улан-Батор, р-н Баянгол, 2-й квартал, пр-кт Мира, 44.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ работы – обсуждение особенностей агрегированного оценивания производственно-экономических систем с помощью логико-математического моделирования. **МЕТОДЫ.** Рассматривается методика экспертного оценивания качества функционирования производственно-экономических систем с помощью знаниевых технологий. В основу положено моделирование системы множеством нечетких продукций и вычисление агрегированной оценки в ходе присоединенного логического вывода на базе технологии экспертных систем. Затронуты вопросы назначения оценок функциональным элементам, степеней истинности нечетким продукциям, а также проблемы выбора закона агрегирования и дополнительных преобразований (калибровки) результата. **РЕЗУЛЬТАТОМ** исследования служит уточнение методики логико-аксиологического оценивания для производственно-экономических систем. **ВЫВОДЫ.** Степени истинности нечетких продукций задаются экспертами путем сочетания прямого оценивания с ранжированием компонентов системы по ценности. Оценки функциональным элементам назначаются аудиторами по *n*-балльной шкале, учитывающей состояние элементов. Агрегирование выполняется по «закону наименьших». В общем случае в алгоритм логико-аксиологического оценивания следует заложить процедуру калибровки результата.

Ключевые слова: агрегированное оценивание, база знаний, качество, нечеткий вывод, нечеткая логика, производственная система, экспертная система.

Информация о статье. Дата поступления 19 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 01 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Аршинский В.Л., Аршинский Л.В., Доржсурэн Хишигсурэн. Методика экспертного оценивания качества функционирования производственно-экономических систем на основе знаниевых технологий // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 63–78. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-63-78

KNOWLEDGE TECHNOLOGY-BASED METHOD OF EXPERT ESTIMATION OF PRODUCTIVE-ECONOMIC SYSTEM OPERATION QUALITY

V.L. Arshinsky, L.V. Arshinsky, Dorjsuren Khishigsuren

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

¹Аршинский Вадим Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизированных систем, e-mail: arshinskyv@mail.ru

Vadim L. Arshinsky, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automated Systems, e-mail: arshinskyv@mail.ru

²Аршинский Леонид Вадимович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационных систем и защиты информации, e-mail: larsh@mail.ru

Leonid V. Arshinsky, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Systems and Information Security, e-mail: larsh@mail.ru

³Доржсурэн Хишигсурэн, преподаватель, e-mail: khishigsurenkhishgee238@gmail.com
Dorjsuren Khishigsuren, Lecturer, e-mail: khishigsurenkhishgee238@gmail.com



Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
Transport Institute of Mongolia
44, Peace Ave., 2nd quarter, Bayangol district, Ulaanbaatar, Mongolia

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to discuss the features of logical mathematical modeling-based aggregate estimation of productive-economic systems. **METHODS.** The paper deals with the methods of expert estimation of the operation quality of productive-economic systems based on knowledge technologies. The study is based on modeling a system by means of the set of fuzzy productions and computing an aggregate evaluation as a logical inference based on the technology of expert systems. The paper discusses the issues of scoring of the functional elements, truth degrees for fuzzy productions as well as the problems of choosing the law of aggregation and additional transformations (calibration) of results. **RESULTS.** The result of this research is specified procedure of logical-axiological evaluation for productive-economic systems. **CONCLUSIONS.** The experts set the truth degrees of fuzzy productions by the combination of direct evaluation and ranking of system components in terms of value. The auditors assess the functional elements by the n-point scale taking into account the state of the elements. Aggregation is performed according to the "law of the least". In general, the algorithm of logical-axiological evaluation must also include the calibration of result.

Keywords: aggregated evaluation, knowledge base, quality, fuzzy inference, fuzzy logic, production system, expert system

Information about the article. Received February 19, 2018; accepted for publication March 1, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Arshinsky V.L., Arshinsky L.V., Dorzhsuren Khishigsuren. Knowledge technology-based method of expert estimation of productive-economic system operation quality. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 63–78. (in Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-63-78

Введение

Одной из проблем эффективного управления производственной системой является агрегированная оценка качества ее функционирования. Подобные оценки и методики их получения сегодня достаточно разнообразны. В работе рассматривается одна из таких методик, основанная на технологии экспертных систем. В ее основу положено описание системы производственной базой знаний (БЗ), содержащей нечеткие продукции, а агрегат рассчитывается в ходе присоединенного логического вывода с последующими преобразованиями.

Производственная система является сложной иерархической системой, содержащей разнообразные компоненты, в качестве которых могут выступать подсистемы нижнего уровня иерархии и функциональные элементы – исполнительные звенья (низовые службы, подразделения или, при необходимости, отдельные работники⁴). Компоненты формируют свои вклады в общую функциональность и связаны между

собой. Оценку качества функционирования системы можно моделировать на основе знаниевых технологий. При этом общая задача разбивается на две последовательно решаемые подзадачи:

- моделирование структуры и взаимосвязей системы с помощью онтологий (онтологическое моделирование);
- преобразование онтологии в производственную базу знаний с ядрами продукций вида

$$\neg C_i \rightarrow \neg C', \quad (1)$$

где C_i связано с компонентом C_i системы соответствующего уровня иерархии, а C' – непосредственно предшествующим ему и содержащим C_i компонентом C' верхнего уровня (рис. 1). C_i здесь и далее называем субкомпонентами компонента C' , а C' – надкомпонентом компонентов C_i .

⁴Балдин К.В., Воробьев С.Н., Уткин В.Б. Управленческие решения: учебник для вузов. 2-е изд. М.: Дашков и К°, 2006. 496 с. / Baldin K.V., Vorobiev S.N., Utkin V.B. Managerial decisions: Textbook for universities. Moscow: Dashkov and Co. Publ., 2006. 496 p.

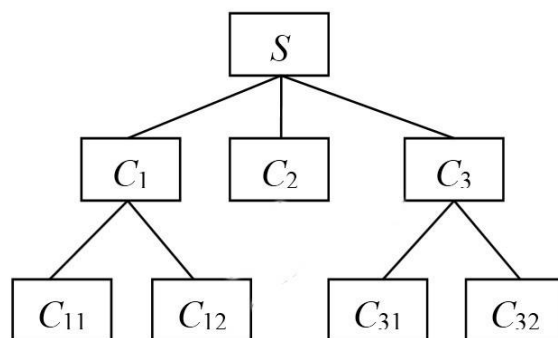


Рис. 1. Производственная система как иерархия
Fig. 1. Production system as a hierarchy

Надкомпонентом может выступать как сама система, так и любая из ее подсистем, компонентами нижнего уровня – функциональные элементы или подсистемы нижнего уровня. На рис. 1 система S является надкомпонентом компонентов C_1 , C_2 и C_3 , которые служат ее субкомпонентами. В свою очередь C_1 и C_3 – надкомпоненты компонентов C_{11} , C_{12} и C_{31} , C_{32} , которые являются их субкомпонентами. Компоненты C_2 , C_{11} , C_{12} , C_{31} , C_{32} также являются функциональными элементами системы S .

Каждая продукция (1) характеризуется истинностью, которая выражена числом из интервала $[0,1]$, или, что более удобно с вычислительной точки зрения, числом из целочисленного множества $0 \div 100$. Истинность рассматривается как показатель ценности субкомпонента C_i для надкомпонента C . Она определяет величину вклада C_i в убыль C в случае полной утраты C_i [1, 2]. Сама оценка строится как прямой присоединенный вывод на производственной БЗ, где исходные оценки функцио-

нальных элементов задаются аудиторами, оценивающими их состояние.

Известно, что правдоподобный вывод такого типа сопровождается расчетом истинности заключения на основе истинностей малой и большой посылок. Причем, если одно и то же заключение получено по различным цепочкам вывода, следует объединить полученные значения истинности. Эта процедура и легла в основу обсуждаемой методики. Однако возникает ряд вопросов:

1. Как задавать ценности компонентов.
2. Как задавать оценки функциональных элементов.
3. Какую функцию (функции) выбрать в качестве закона агрегирования.
4. Достаточными ли оказываются оценки, полученные в ходе присоединенного вывода, или их требуется подвергнуть еще каким-либо преобразованиям.

Настоящая статья посвящена их обсуждению.

Определение ценностей компонентов производственной системы

Задание ценностей компонентов – один из основных вопросов методики. От того, какова их ценность, зависят результаты расчетов. При этом можно исходить из двух взглядов: «натурального» и «оценочного». Под натуральным понимаем расчет ценностей и показателей исходя из реальных количественных характеристик систе-

мы, выраженных в безразмерных величинах. Например, для железнодорожных станций это может быть пропускная и перерабатывающая способность. Так, если за 1 принимать пропускную и перерабатывающую способность полноценно функционирующей станции, то 0,9 означает ее снижение на 10%. В этом случае ценность



компонента определяет потенциальное снижение пропускной и перерабатывающей способности при не функционировании (остановке, расформировании и т.п.) той или иной службы или подразделения. Однако такой взгляд чреват тем, что «за бортом» окажутся исполнительные звенья, не влияющие на перевозочный процесс непосредственно. Ликвидация или ухудшение качества работы такого звена если и сказывается на натуральных показателях, то опосредованно. Вследствие этого более перспективным представляется другой, оценочный подход.

При оценочном подходе предполагается, что показатели ценности и степень функциональности задаются экспертами. Такие оценки субъективны.

В теории принятия решений приняты различные способы субъективного оценивания. Наиболее простым выглядит непосредственное назначение числовых оценок. Для ценностей – это назначение ценностей компонентам исходя из представлений эксперта о степени убывания функциональности надкомпонента при утрате соответствующего субкомпонента. При этом шкала $[0,1]$ и даже 100-балльная шкала выглядят излишне подробными, и оценки лучше назначать в лингвистической форме, связывая с каждым лингвистическим значением число из интервала $[0,1]$ или множества $0 \div 100$. Табл. 1 приведена как таблица соответствий, где числовые значения указаны как для непрерывной, так и для целочисленной шкал.

В этом случае ценности могут задаваться исходя из приоритетности компонентов с точки зрения их влияния на перевозочный процесс. Наиболее важным считается тот компонент, утрата которого ведет, с точки зрения эксперта, к максимальному ущербу функциональности соответствующего ему надкомпонента. Причем в отличие от традиционных методик здесь можно вводить ключевые компоненты, утрата которых ведет к утрате (нефункционированию, «параличу в работе») надкомпонента. Как уже говорилось, подобные модели субъективны. Однако они позволя-

ют принимать решения, когда опереться на естественные, натуральные числовые показатели трудно или невозможно.

Интересным приемом назначения ценности компонентам является метод весовых коэффициентов Фишберна [3], используемый в задачах принятия решений (см. например [4–7]). Согласно этому методу числовые значения ценности можно задать, ранжируя компоненты C_i по убыванию с последующим присвоением им числовых значений по правилу

$$\alpha_i = \frac{2 \cdot (n+1-i)}{n(n+1)}, \quad (2)$$

где $\alpha_i = \|\neg C_i \rightarrow C'\|$ – ценность компонента C_i для C' , рассчитываемая по методу Фишберна; n – число компонентов C_i в надкомпоненте C' ; i – номер ранга компонента C_i . Причем, чем выше ранг (ценней компонент), тем меньше i . Наивысшим рангом (наивысшей ценностью) обладает компонент с номером 1.

Формула (2) работает при строгой упорядоченности всех компонентов, когда число рангов равно числу компонентов n : $i \in \{1, \dots, n\}$. В случае нестрогого порядка, когда какие-либо пары компонентов могут совпадать по рангу, соответствующие коэффициенты предлагается рассчитывать по рекуррентной схеме [7]:

$$r_{i-1} = \begin{cases} r_i, & \text{если } C_{i-1} \approx C_i; \\ r_i + 1, & \text{если } C_{i-1} \succ C_i. \end{cases}$$

Здесь запись $C_{i-1} \approx C_i$ показывает, что ранги равны; $C_{i-1} \succ C_i$ – ранг C_{i-1} превышает ранг C_i .

После этого

$$\alpha_i = \frac{r_i}{\sum_{i=1}^n r_i},$$

где i – номер компонента в ранжированном списке; $r_n = 1$.



Таблица 1

Соответствие числовых и лингвистических значений ценности

Table 1

Correspondence of numeric and linguistic senses of value

Лингвистическое значение ценности / Linguistic sense of value	Содержательный смысл / Conceptual meaning	Числовое значение / Numerical value
Нулевая / Zero	Утрата компонента C_i никак не влияет на функциональность надкомпонента C' / Loss of the component C_i has no affect on the functionality of the subcomponent C'	0 (0)
Очень малая / Very low	Утрата компонента C_i практически не влияет на функциональность надкомпонента C' / Loss of the component C_i practically does not affect the functionality of the subcomponent C'	0,1 (10)
Малая / Low	Утрата компонента C_i слабо влияет на функциональность надкомпонента C' / Loss of the component C_i insignificantly affects the functionality of the subcomponent C'	0,3 (30)
Средняя / Average	Утрата компонента C_i заметно влияет на функциональность надкомпонента C' / Loss of the component C_i noticeably affects the functionality of the subcomponent C'	0,5 (50)
Большая / Big	Утрата компонента C_i сильно влияет на функциональность надкомпонента C' / Loss of the component C_i significantly affects the functionality of the subcomponent C'	0,7 (70)
Очень большая / Very big	Наличие компонента C_i принципиально необходимо для функционирования надкомпонента C' / Presence of the component C_i is essential for the operation of the subcomponent C'	0,9 (90)
Ключевая / Key	Утрата компонента C_i влечет нефункционирование (остановку в работе) надкомпонента C' / Loss of the component C_i stops the operation of the subcomponent C'	1,0 (100)

При этом системе безразличных друг другу n альтернатив отвечает набор равных ценностей:

$$\alpha_i = \frac{1}{n}.$$

Пример, взятый из [7], представлен в табл. 2.

Использование коэффициентов Фишберна заменяет задачу прямого назначения ценностей задачей ранжирования компонентов C_i . При этом ранг компонента тем выше (номер i тем меньше), чем больший ущерб, по мнению эксперта, понесет C' при утрате C_i .

Замена назначения ценностей ранжированием существенно упрощает экспертное оценивание. Однако легко заме-



тить, что при четырех и более классах эквивалентности по рангам самые слабые альтернативы в этой системе воспринимаются как компоненты с очень малой ценностью, а самый значимый компонент (компоненты) имеет не более чем среднюю ценность, если ориентироваться на табл. 1. При этом убыль характерных значений с ростом n идет по закону

$$\alpha_i \sim \frac{1}{n}.$$

Кроме того, при таком оценивании невозможны ключевые и нулевые по ценности компоненты.

Относительная «сложность» схемы Фишберна связана с необходимостью обеспечения равенства суммы коэффициентов единице. При логико-аксиологическом подходе необходимости в этом нет. Поэтому здесь можно воспользоваться более простой интервальной проце-

дурой преобразования рангов в количественные показатели по следующей методике (здесь и далее речь идет о субкомпонентах C_i некоторого компонента C):

1. Разбить множество компонентов $\{C_i\}$, $i=1, \dots, n$, на систему K непересекающихся подмножеств $\{R_k\}$ так, что $R_{k1} \cap R_{k2} = \emptyset$, при $k_1 \neq k_2$, и $\bigcup_{k=1}^K R_k = \{C_i\}$. При

этом, если компоненты C_{i1} и C_{i2} таковы, что $C_{i1} \approx C_{i2}$, они принадлежат одному множеству R_k , а если нет, то разным. Условимся считать, что если $C_{i1} \succ C_{i2}$ и $C_{i1} \in R_{k1}$, а $C_{i2} \in R_{k2}$, то $R_{k1} \succ R_{k2}$ и $k_1 < k_2$. То есть R_k – множество компонентов одного ранга, а сами подмножества упорядочены согласно рангам образующих их компонентов. Подмножества R_1 и R_K ассоциируем с ключевыми и нулевыми компонентами соответственно (при этом они могут быть пустые).

Таблица 2

Примеры коэффициентов Фишберна

Table 2

Examples of Fishburn coefficients

n	Предпочтения / Preferences	α_1	α_2	α_3	α_4
2	$C_1 \approx C_2$	1/2	1/2	–	–
	$C_1 \succ C_2$	2/3	1/3	–	–
3	$C_1 \approx C_2 \approx C_3$	1/3	1/3	1/3	–
	$C_1 \succ C_2 \approx C_3$	2/4	1/4	1/4	–
	$C_1 \approx C_2 \succ C_3$	2/5	2/5	1/5	–
	$C_1 \succ C_2 \succ C_3$	3/6	2/6	1/6	–
4	$C_1 \approx C_2 \approx C_3 \approx C_4$	1/4	1/4	1/4	1/4
	$C_1 \succ C_2 \approx C_3 \approx C_4$	2/5	1/5	1/5	1/5
	$C_1 \approx C_2 \succ C_3 \approx C_4$	2/6	2/6	1/6	1/6
	$C_1 \approx C_2 \approx C_3 \succ C_4$	2/7	2/7	2/7	1/7
	$C_1 \succ C_2 \succ C_3 \approx C_4$	3/7	2/7	1/7	1/7
	$C_1 \succ C_2 \approx C_3 \succ C_4$	3/8	2/8	2/8	1/8
	$C_1 \approx C_2 \succ C_3 \succ C_4$	3/9	3/9	2/9	1/9
	$C_1 \succ C_2 \succ C_3 \succ C_4$	4/10	3/10	2/10	1/10



2. Каждому подмножеству R_k , кроме R_1 и R_K , ставим в соответствие число из интервала $[0,1]$ так, чтобы эти числа делили данный отрезок на равные или примерно равные (в силу округления) подинтервалы. Таких подинтервалов $K-1$.

3. Объявляем полученные числа ценностями компонентов из соответствующих подмножеств. Ключевым и нулевым компонентам, если они имеются, присваиваются значения ценности, равные 1 и 0.

При необходимости эта процедура очевидным образом трансформируется на случай целочисленных ценностей, например $0 \div 100$. Пример из табл. 2 будет выглядеть, как показано в табл. 3 (ключевые и нулевые компоненты, если они есть, не рассматриваем).

Убывания ценности с увеличением числа компонентов здесь не происходит.

Отметим, что условие равенства подинтервалов ниоткуда не следует, это своего рода эвристика. Каждый из подходов – прямой и ранговый – имеет определенные недостатки. Первый требует от эксперта

количественных представлений о степени убывания функциональности надкомпонента с утратой того или иного компонента C_i . Второй не позволяет использовать знания эксперта об утрате функциональности, если оно есть. В связи с этим представляется целесообразным объединить их следующим образом:

1. Разбить множество $\{C_i\}$ на классы эквивалентности по рангам и упорядочить ранги согласно ценности.

2. Каким-то из классов, если таковые с точки зрения эксперта имеются, назначить ценности прямым образом.

3. Для ранжированных классов, которым ценности назначить не удалось, назначить их с помощью интервалов так, чтобы интервал между группами с известными (заданными прямым образом) ценностями разбивался на равные подинтервалы числом $n_{k-1,k} + 1$, где $n_{k-1,k}$ – количество рангов (классов эквивалентности по рангу), попавших между соседними рангами R_{k-1} и R_k , ценность которых указана напрямую.

Таблица 3

Примеры значения ценностей по интервальному методу

Table 3

Examples of sense of values by the interval method

n	Предпочтения / Preferences	α_1	α_2	α_3	α_4
2	$C_1 \approx C_2$	1/2 (50)	1/2 (50)	–	–
	$C_1 \succ C_2$	2/3 (67)	1/3 (33)	–	–
3	$C_1 \approx C_2 \approx C_3$	1/2 (50)	1/2 (50)	1/2 (50)	–
	$C_1 \succ C_2 \approx C_3$	2/3 (67)	1/3 (33)	1/3 (33)	–
	$C_1 \approx C_2 \succ C_3$	2/3 (67)	2/3 (67)	1/3 (33)	–
	$C_1 \succ C_2 \succ C_3$	3/4 (75)	2/4 (50)	1/4 (25)	–
4	$C_1 \approx C_2 \approx C_3 \approx C_4$	1/2 (50)	1/2 (50)	1/2 (50)	1/2 (50)
	$C_1 \succ C_2 \approx C_3 \approx C_4$	2/3 (67)	1/3 (33)	1/3 (33)	1/3 (33)
	$C_1 \approx C_2 \succ C_3 \approx C_4$	2/3 (67)	2/3 (67)	1/3 (33)	1/3 (33)
	$C_1 \approx C_2 \approx C_3 \succ C_4$	2/3 (67)	2/3 (67)	2/3 (67)	1/3 (33)
	$C_1 \succ C_2 \succ C_3 \approx C_4$	3/4 (75)	2/4 (50)	1/4 (25)	1/4 (25)
	$C_1 \succ C_2 \approx C_3 \succ C_4$	3/4 (75)	2/4 (50)	2/4 (50)	1/4 (25)
	$C_1 \approx C_2 \succ C_3 \succ C_4$	3/4 (75)	3/4 (75)	2/4 (50)	1/4 (25)
	$C_1 \succ C_2 \succ C_3 \succ C_4$	4/5 (80)	3/5 (60)	2/5 (40)	1/5 (20)



Следует заметить, что проиллюстрированный в табл. 2 метод уже частично реализует эту идею, поскольку в нем ключевые и нулевые компоненты назначаются прямым образом, а всем остальным компонентам присваивается ценность с учетом их рангов, исходя из равномерного разбиения интервала $[0,1]$ на подинтервалы. Объединенный метод доводит этот прием до логического завершения.

Обзор различных методов выбора весовых коэффициентов представлен в [4].

Оценка функциональных элементов

При выставлении оценок функциональным элементам – должностным лицам или службам (если в них не выделяются отдельные работники), исходим из прямого оценочного подхода. В этом случае каждому элементу по результатам его работы проверяющим (аудитором) выставляется оценка, которая априори субъективна. Такой подход достаточно распространен при анализе систем с участием человека. Безусловно, аудитор может выставлять оценку, исходя из «натуральных» показателей работы элемента. Она носит безразмерный характер и потому может участвовать в агрегировании наряду с другими такими же оценками других функциональных элементов. При этом возможно проставление оценок непосредственно по шкале $[0,1]$, или, что более удобно, по целочисленной шкале $0-100$, а также по более привычным шкалам – 5-, 7-, 10-, 12-балльной и т.д. Для перевода последних в 100-балльную (100%-ю) и обратно можно воспользоваться опытом, накопленным в сфере образовательных технологий. Например, в работе В.А. Красильниковой⁵ для результатов тестирования предлагается следующее соответствие:

– оценка «5» («отлично») выставляется испытуемым за верные ответы, кото-

Различные вопросы экспертного оценивания при принятии решений освещаются также в источниках [8–23] и других. Они используются для решения соответствующих управленческих [5, 8, 9], экономических [6, 7, 10, 11], технических [11–16] и иных задач. Работа [17] интересна критикой популярного среди специалистов метода анализа иерархий [18]. Систематические описания и анализ соответствующих методов представлены в работах⁴ [5, 6, 8, 9, 15, 19–23].

рые составляют не менее 91% от общего количества вопросов;

– оценка «4» соответствует работе, которая содержит от 71 до 90% правильных ответов;

– оценка «3» соответствует от 70 до 50% правильных ответов;

– работа, содержащая менее 50% правильных ответов, оценивается как неудовлетворительная.

Близкие к нему соответствия приведены в [24, 25].

Соответствие между 100-балльной шкалой и некоторыми другими системами оценок дано в работах [26] и [27].

Интересно, что тестовый балл как доля правильных ответов может рассматриваться как оценка не в порядковой, а в абсолютной шкале, поскольку, например, результат 0,6 (или 60%) при равной трудности или значимости заданий означает, что испытуемый выполнил правильно в два раза больше заданий, чем испытуемый с оценкой 0,3 (30%).

В связи с вышесказанным можно предложить следующее соответствие для 5-балльного оценивания:

– (0,9; 1] – для «отлично»;

– (0,8; 0,9] – «хорошо»;

– (0,6; 0,8] – «удовлетворительно»;

⁵Красильникова В.А. Подготовка заданий для компьютерного тестирования: метод. рекомендации. Оренбург: Изд-во ОГУ, 2004. 31 с. / Krasilnikova V.A. Preparation of tasks for computer testing: methodological recommendations. Orenburg: Orenburg State University Publ., 2004, 31 p.



– (0; 0,6] – «плохо»;

– 0 – выделен, чтобы зафиксировать факт нефункционирования или фактического отсутствия элемента.

На целочисленном множестве $0 \div 100$ им соответствуют подмножества: $91 \div 100$; $81 \div 90$; $61 \div 80$; $1 \div 60$ и 0 соответственно.

В ходе проверки аудитор может выставлять оценки по 100-балльной шкале с последующим переводом результата (агрегата) в 5-балльный результат, либо сразу оперировать 5-балльной шкалой со следующим соответствием:

– «отлично» – 1 (либо 100 при целочисленном оценивании);

– «хорошо» – 0,85 (85);

– «удовлетворительно» – 0,7 (70);

– «плохо» – 0,3 (30);

– «0» – 0.

Единица для оценки «отлично» выбрана, чтобы зафиксировать факт полноценного функционирования элемента, ноль – фактическое отсутствие элемента. В остальных случаях в качестве оценки выбрана середина соответствующего интервала.

При необходимости 5-балльная шкала может быть заменена на 7-, 10-, 12-балльную или любую иную по такому же принципу. Например, для 7-балльной шкалы это:

– 1 – «превосходно»;

– (0,9; 1) – «очень хорошо» (0,95 либо 95 при обратном соответствии);

– (0,8; 0,9] – «хорошо» (0,85

либо 85);

– (0,6; 0,8] – «удовлетворительно» (0,7 либо 70);

– (0,3; 0,6] – «плохо» (0,45 либо 45);

– (0; 0,3] – «очень плохо» (0,15 либо 15);

– 0 – элемент отсутствует.

Если используется 5-балльная шкала, можно предложить следующие критерии балльности при оценке производственных систем:

– «отлично» – замечаний к функционированию элемента нет, либо ими с точки зрения аудитора можно пренебречь;

– «хорошо» – есть отдельные замечания, слабо влияющие на функциональность элемента;

– «удовлетворительно» – функциональность элемента снижена, но не критическим образом;

– «плохо» – качество функционирования элемента снижено критически, что ставит под вопрос его работоспособность;

– «0» – элемент не функционирует полностью, отсутствует в системе, либо разрушен (и т.п.).

Нужно отметить, что большие размеры подинтервалов в «неудовлетворительной» части вышеуказанных шкал оправданы тем, что с точки зрения принятия управленческих решений не принципиально, насколько плох тот или иной компонент. В любом случае он требует серьезного управленческого вмешательства.

Выбор закона агрегирования

В работе [1] представлен ряд законов для объединения свидетельств в ходе логического вывода. В качестве функций могут выступать законы усреднения (среднее арифметическое, среднее геометрическое и т.п.), а также известные в нечеткой математике t - и s -нормы (t -конормы). Выбор закона агрегирования также зависит от натурального либо оценочного подхода. При натуральном подходе закон агрегирования должен отражать естественные количественные закономерности накопления

соответствующих показателей и в этом смысле может рассматриваться как полноценная количественная модель. При оценочном подходе столь жесткое требование отсутствует, здесь важны результаты в виде упорядочения по принципу «лучше-хуже». Однако качественная зависимость типа «чем хуже работают функциональные элементы, тем хуже работает система в целом» должна выполняться. Оценки при этом отражают меру работоспособности, функциональности компонентов. Как из-



вестно, несмотря на серьезную критику⁶, при сворачивании частных оценок в агрегат нередко стремятся получить результат на основе средних (средневзвешенных) оценок. Рассматриваемая методика позволяет строить БЗ для такого оценивания (см., например, [28]). Однако кроме усреднения могут применяться триангулированные (треугольные) нормы и конормы. В [1, 2] отмечается, что выбор подходящего закона агрегирования целесообразно подчинить задаче, для которой выполняется агрегирование. Поскольку управляющие воздействия необходимы в первую очередь при снижении эффективности системы, выбор соответствующего закона целесообразно осуществлять исходя из принципа выработки заключения о ее низкой эффективности. При этом исходим из того, что любой компонент рассматриваемых систем является необходимым и ни один в отдельности не является достаточным для ее функционирования. В соответствии с техникой, изложенной в [1], агрегируются ущербы функциональности, определяемые выражением

$$\Delta e_i(C') = \Delta e(C_i) \vee (C_i, C'),$$

или, что то же самое, шагом вывода

$$\neg C_i, \neg C_i \rightarrow \neg C' \vdash \neg C' : \|\neg C'\| = \|\neg C_i\| \cdot \|\vee_i\|.$$

Здесь $\Delta e_i(C')$ – ущерб эффективности компонента C' , обусловленный снижением (ущербом) эффективности субкомпонентов C_i ; $\vee(C_i, C')$ – ценность субкомпонента C_i для C' ; $\neg C_i$ – высказывание о нефункциональности C_i ; $\neg C_i$ – высказывание о нефункциональности C' ; $\neg C_i \rightarrow \neg C'$ – высказывание о том, что нефункциональность C_i влечет нефункциональность C' ; $\|\dots\|$ – истинность соответствующего высказывания.

Агрегирование выполняется как шаг вывода следующего типа [1]:

$$\neg C_1, C_1 \rightarrow C' \vdash \neg C' : \|\neg C'\|_1 = \|C_1\| \cdot \|C_1 \rightarrow \neg C'\|;$$

$$\dots \\ \neg C_n, C_n \rightarrow C' \vdash \neg C' : \|\neg C'\|_n = \\ = \|C_n\| \cdot \|C_n \rightarrow \neg C'\|.$$

$$\neg C' : \|\neg C'\| = \text{Agr}(\|\neg C'\|_1, \dots, \|\neg C'\|_n).$$

Здесь $\text{Agr}(\|\neg C'\|_1, \dots, \|\neg C'\|_n)$ – функция (закон) агрегирования частных вкладов в ущерб в общий ущерб функциональности надкомпонента C' .

Разберем следующие законы агрегирования:

А. Усредняющее агрегирование.

В. Агрегирование на основе t -норм.

С. Агрегирование на основе t -конорм.

Зачастую выбор того или иного закона осуществляется из соображений его удобства, привычности, эффективности при решении аналогичных задач. Попробуем взглянуть на эту проблему с точки зрения лица, принимающего решения (ЛПР).

А. Усредняющее агрегирование проводится в первую очередь на основе среднего арифметического (а также среднего арифметического взвешенного). При данном подходе господствует представление, что итоговая эффективность системы и ее подсистем оценивается в среднем. При этом недоработки и даже «провалы» в одной части, с точки зрения ЛПР, вполне могут компенсироваться успехами в другой. Оценка на основе среднего арифметического покажет низкий результат, только если плохи все частные оценки. Введение коэффициентов важности (в нашем случае – ценностей) заставляет заострить внимание на наиболее существенных составляющих, но общая парадигма при этом не изменится. Такая точка зрения достаточно распространена при принятии решений. Однако в этом случае невозможен учет ключевых компонентов.

⁶Орлов А.И. Теория принятия решений: учеб. пособие. М.: Экзамен, 2005. 656 с. / Orlov A.I. Theory of decision-making: Learning aids. Moscow: Examen Publ., 2005, 656 p.



Агрегирование на основе среднего геометрического или среднего гармонического имеет свои особенности. В этом случае также возможна компенсация «провалов» по одним направлениям «успехами» по другим. Однако компенсировать тем сложнее, чем серьезнее провал. При этом невыполнение функций хотя бы одним компонентом влечет невыполнение функций всей системой или соответствующей подсистемой. Как следствие, при бездеятельности каких-либо компонентов (даже одного) становится невозможным «спрятать» нефункциональность этих компонентов за «успехами» других. Однако менее удачным такое агрегирование выглядит в случае, когда агрегируются ущербы (как в нашем случае). Нулевой ущерб в работе любого из субкомпонентов означает 100%-ю успешность соответствующего надкомпонента. С точки зрения ЛПР, это означает высокую общую оценку за хорошую работу хотя бы одной службы. На практике подобный взгляд обычно не используется.

Более разумным при усреднении выглядит закон медианы. В нашем случае «плохая» медиана означает низкую функциональность более половины подразделений и служб предприятия. Но ими также могут оказаться второстепенные службы.

В. Агрегирование на основе t -норм. Данный вид агрегирования не годится для объединения ущербов по тем же соображениям, что и усреднение на основе среднего геометрического или среднего гармонического. Здесь ущерб в функциональности надкомпонента связан только с ущербом во всех субкомпонентах, что неприемлемо, поскольку нельзя считать успешными службу или подразделение, где хорошо работает хотя бы один сотрудник.

С. Агрегирование на основе t -конорм. В [1, 2] в качестве законов агрегирования ущербов выбраны t -конормы. В общем случае они обеспечивают рост ущерба функциональности надкомпонента при ущербе функциональности любого из его субкомпонентов. Это выглядит разумным, но возникает проблема выбора под-

ходящей конормы. Рассмотрим их подробнее.

Аддитивная конорма $\min(1, x+y)$. Этот закон во многом похож на агрегирование по среднему арифметическому взвешенному. Если сумма ценностей субкомпонентов равна 1, то агрегированный ущерб по этому закону равен среднему ущербу при весовых коэффициентах, равных ценностям. Однако если их сумма превышает 1, максимальный ущерб функциональности возникает при некачественной работе лишь части соответствующих компонентов. С точки зрения ЛПР, это означает признание какой-либо подсистемы или системы в целом нефункционирующей, если суммарный ущерб превышает определенный порог. Таким образом, это вполне приемлемая стратегия принятия решений. Но при этом накопление ущербов может вестись по второстепенным (малоценным) компонентам, что не всегда целесообразно.

Мультипликативная конорма $x+y-x \cdot y$. Здесь также происходит накопление всех выявленных ущербов. При этом основной вклад в результат вносят субкомпоненты с наибольшими вкладами в агрегат соответствующего надкомпонента или системы в целом. Если же наиболее значимые компоненты функционируют нормально, общий и формально неприемлемый ущерб накапливается благодаря второстепенным компонентам, как в предыдущем случае.

Пессимативная конорма $\max(x, y)$. Пессимативное агрегирование предполагает, что общий ущерб функциональности надкомпонента определяется наихудшей из его составляющих с учетом ценности. С точки зрения авторов, это означает применение «закона наименьших» по А.А. Богданову – одного из основных законов функционирования многих систем, включая производственные [29]. Такая позиция также используется при принятии решений. Серьезным доводом в пользу данной стратегии является фактическое требование к руководителю обеспечивать качественную работу всех подчиненных ему подразделений и служб независимо от их места в произ-



водственном процессе. В этом случае оценка может быть снижена за некачественную работу даже второстепенной

службы, хотя и с учетом ее ценности. *Представляется целесообразным опираться именно на этот закон.*

Дополнительные преобразования

В заключение обсудим вопрос достаточности оценок, полученных в ходе присоединенного вывода и необходимости дополнительных преобразований. Выше говорилось, что основой для получения агрегированных показателей производственной системы могут служить натуральные либо оценочные показатели функциональных элементов. При этом отмечалось, что если процедура оценивания отражает реальные количественные взаимосвязи, она может рассматриваться как полноценная количественная модель, а значит, дополнительных преобразований не требуются. В случае оценочного подхода ситуация иная. Как следует из предыдущего, агрегирование осуществляется на основе тех или иных законов, включая нелинейные. Это приводит к тому, что при равномерном убывании показателей исполнительных звеньев агрегат убывает неравномерно: медленнее в одних диапазонах, быстрее в других (см. рис. 2). В результате, например, оценка «хорошо» для функциональных элементов может превратиться в оценку «отлично» для агрегата или наоборот. Для решения этой проблемы предлагается дополнить вышеописанную процедуру преобразованием, учитывающим это обстоятельство (рис. 3).

В основу преобразования положено представление, что агрегированная оценка системы в целом должна совпадать с оценками функциональных элементов, когда все они равны друг другу:

$$\forall f_i (\chi(f_i) = \chi^*) \Rightarrow \chi(S) = \chi^*.$$

Здесь f_i , $i = \overline{1, N}$ – функциональные элементы системы S ; N – общее количество функциональных элементов; $\chi(f_i)$, $\chi(S)$, χ^* – характеризующие числа.

Аналогичная точка зрения приво-

дится, например, в [16].

Технически это реализуется достаточно просто. Пусть $\Psi(\chi_1, \dots, \chi_N) = \chi(S)$ – функция (алгоритм), преобразующая характеризующие числа функциональных элементов в характеризующее число системы $\chi(S)$. Тогда:

1) строится калибровочная функция $\Psi^*(\zeta) = \Psi(\chi_1 = \zeta, \chi_2 = \zeta, \dots, \chi_N = \zeta)$, где $\zeta \in [0, 1]$;

2) в ходе калибровки рассчитывается итоговая оценка результата с помощью обратной функции $\chi^*(S) = \Psi^{*-1}(\chi(S))$.

Фактически речь идет о преобразовании исходной равномерной шкалы $\chi(S)$ в неравномерную шкалу $\Psi^{*-1}(\chi(S))$. Алгоритмически она с подходящей точностью выполняется следующим образом (см. рис. 3):

1. Шкала значений характеризующих чисел функциональных компонентов разбивается на равные отрезки точками $\{0, 1/k, 2/k, \dots, (k-1)/k, 1\}$.

2. Рассчитываются агрегаты:

$$\Psi(0, 0, \dots, 0) = \chi^*_0 = 0;$$

$$\Psi(1/k, 1/k, \dots, 1/k) = \chi^*_{1/k};$$

...

$$\Psi((k-1)/k, (k-1)/k, \dots, (k-1)/k) = \chi^*_{(k-1)/k};$$

$$\Psi(1, 1, \dots, 1) = \chi^*_1 = 1.$$

3. Для полученного значения $\chi(S)$ находятся соответствующие ему интервалы $[k'/k, (k'+1)/k]$ и $[\chi^*_{k'}; \chi^*_{k'+1}]$ такие, что $\chi(S) \in [\chi^*_{k'}; \chi^*_{k'+1}]$, где $k' = 1, k-1$.

4. Результирующее значение рассчитывается по формуле

$$\chi^*(S) = \frac{k'}{k} + \frac{1}{k} \cdot \frac{\chi(S) - \chi^*_{k'}}{\chi^*_{k'+1} - \chi^*_{k'}}.$$

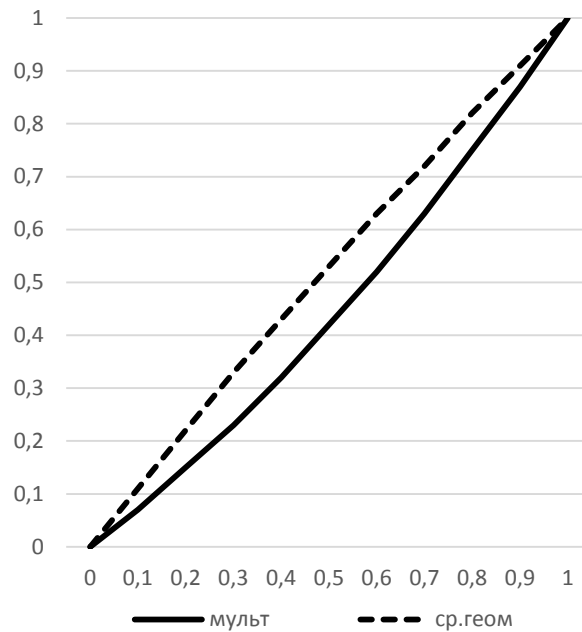


Рис. 2. Нелинейная зависимость значений агрегатов (ось ординат) для двух законов агрегирования при различных значениях характеризующих чисел функциональных элементов (ось абсцисс)

Fig. 2. Nonlinear dependence of aggregate values (ordinate axis) for two aggregation laws at different values of the characterizing numbers of functional elements (abscissa axis)

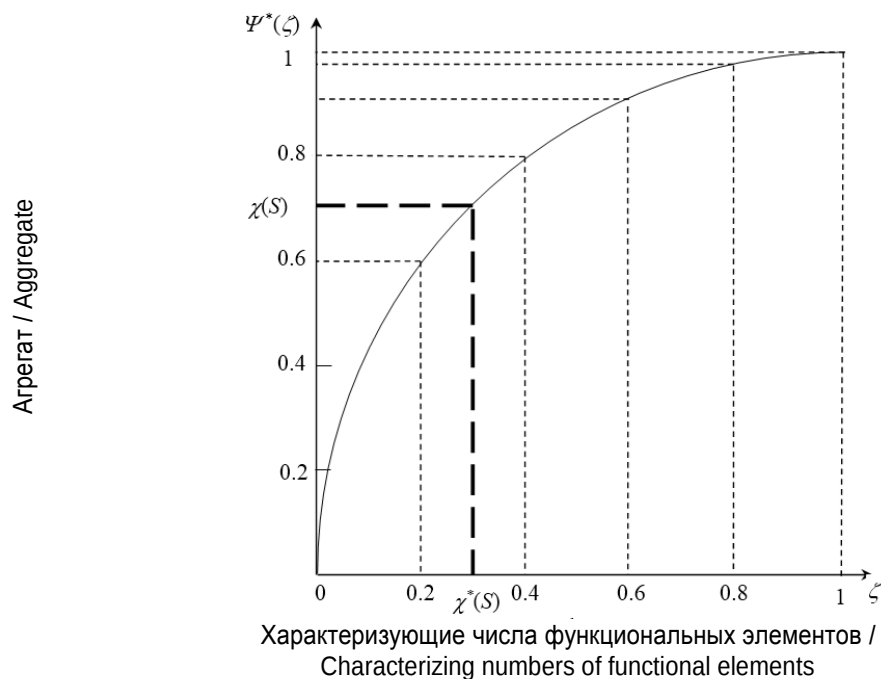


Рис. 3. Иллюстрация к алгоритму калибровки. Здесь $\chi(S) = 0,7$ – исходное значение характеризующего числа; $\chi^*(S) = 0,3$ – характеризующее число, полученное с помощью калибровки; $k = 5$; $k' = 1$; $\chi_{k'}^* = 0,6$; $\chi_{k'+1}^* = 0,8$.

Fig. 3. Illustration to the calibration algorithm. Where $\chi(S) = 0,7$ is the initial value of the characterizing number; $\chi^*(S) = 0,3$ is characterizing number obtained with the help of calibration; $k = 5$; $k' = 1$; $\chi_{k'}^* = 0,6$; $\chi_{k'+1}^* = 0,8$.



С учетом качественного характера расчетов представляется, что линейной аппроксимации здесь вполне достаточно.

Содержательно это означает, что исходный агрегат $\chi(S)$ преобразуется в новое значение $\chi^*(S)$, равное значению ζ , при котором $\Psi(\zeta, \zeta, \dots, \zeta) = \chi(S)$.

Заключение

По результатам выполненной работы предлагается следующее:

1. Задавать истинности нечетких продукций (ценности компонентов производственно-экономической системы) путем разбиения множества субкомпонентов $\{C\}$ на классы эквивалентности по отношению предпочтения (с точки зрения ценности) с последующим:

- ранжированием классов;
- прямым назначением ценности для части классов;
- вычислением ценности оставшихся на основе разбиения интервала значений оценок $[0, 1]$ на соответствующие подинтер-

валы.

2. В качестве оценок работы исполнительных (низовых) звеньев использовать прямое n -балльное оценивание аудиторами, учитывающее состояние звеньев (функциональных элементов).

3. Для агрегирования ущербов функциональности компонентов использовать «закон наименьшего» – t -конорму $\max(x, y)$, что формирует оценку по наихудшему компоненту с учетом его ценности.

4. Включить в методику оценки преобразование результата с помощью калибрующей функции по соответствующему алгоритму.

Библиографический список

1. Аршинский Л.В. Логико-аксиологический подход к оценке состояния систем // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 3 (39). С. 140–146.
2. Аршинский Л.В. Методика агрегированного оценивания систем с поддержкой ключевых компонентов // Онтология проектирования. 2015. № 2 (16). С. 233–245. <https://doi.org/10.18287/2223-9537-2015-5-2-223-232>
3. Фишберн П. Теория полезности для принятия решений. М.: Наука, 1978. 352 с.
4. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Методы выбора весовых коэффициентов локальных критериев // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 06. С. 267–287. <https://doi.org/10.7463/0615.0780334>
5. Баранов Ю.Г. Методы принятия управленческих решений. Псков: Изд-во ПГУ, 2013. 176 с.
6. Потапов Д.К., Евстафьева В.В. О методиках определения весовых коэффициентов в задаче оценки надежности коммерческих банков // Социально-экономическое положение России в новых геополитических и финансово-экономических условиях: реалии и перспективы развития: сб. науч. ст. СПб.: Изд-во Института бизнеса и права. 2008. Вып. 5. С. 191–196.
7. Недосекин А.О. Оценка риска бизнеса на основе нечетких данных. СПб.: Сезам, 2004. 100 с.
8. Мадера А.Г. Моделирование и принятие решений

- в менеджменте. Руководство для будущих топ-менеджеров. М.: ЛКИ, 2010. 688 с.
9. Михайлов Я.В. Управленческие решения: пособие для управленцев-практиков. М.: Экономика, 2011. 143 с.
10. Некрестьянова Ю.Н. Теоретическое обоснование анализов Парето // Предпринимательство. 2013. № 3. С. 56–64.
11. Митяков Е.С., Корнилов Д.А. К вопросу о выборе весов при нахождении интегральных показателей экономической динамики // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 3 (90). С. 289–299.
12. Шилин А.И. Коптелова И.А. Теория принятия решений в проектировании информационно-измерительной техники. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2012. 128 с.
13. Постников В.М., Спиридонов С.Б. Подход к выбору варианта модернизации сервера ЛВС // Наука и образование. 2013. № 2. С. 255–272. <https://doi.org/10.7463/0213.0535392>
14. Максакон А.А., Сакулин С.А. Модель оценки качества внедрения информационной системы на предприятии // Инженерный журнал: наука и инновации. Электронное научно-техническое издание. 2013. № 11 (23). URL: <http://engjournal.ru/articles/1011/1011.pdf> (10.12.2017). <https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-11-1011>
15. Безрук В.М., Пономаренко Н.Н., Скорик Ю.В.



Анализ эффективности методов многокритериального выбора предпочтительного варианта средств телекоммуникаций // Проблемы телекоммуникаций. 2015. № 1 (16). С. 42–53.

16. Сакулин С.А., Алфимцев А.Н. Выбор операторов агрегирования пользовательских критериев для оценки удобства веб-страниц // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 1. С. 90–102.

<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-90-102>

17. Подиновский В.В., Подиновская О.В. О некорректности метода анализа иерархий // Проблемы управления. 2011. № 1. С. 8–13.

18. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.

19. Подиновский В.В., Потапов М.А. Метод взвешенной суммы критериев в анализе многокритериальных решений: pro et contra // Бизнес-информатика. 2013. № 3 (25). С. 41–48.

20. Спиридонов С.Б., Булатова И.Г., Постников В.М. Анализ подходов к выбору весовых коэффициентов критериев методом парного сравнения критериев // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 6. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/16TVN617.pdf> (09.01.2018).

21. Подиновский В.В., Потапов М.А. Важность критериев в многокритериальных задачах принятия решений: теория, методы, софт и приложения // Открытое образование. 2012. № 2. С. 55–61.

22. Салтыков С.А. Экспериментальное сопоставление методов взвешенной суммы, теории полезности и теории важности критериев для решения много-

критериальных задач с балльными критериями // Управление большими системами. 2010. Вып. 29. С. 16–41.

23. Ларичев О.И. Теория и методы принятия решений, а также Хроника событий в волшебных странах. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Логос, 2008. 392 с.

24. Тесленко В.И. Методика анализа и оценка результатов тестирования // Вестник КГПУ им. В.П. Астафьева. 2006. Т. 1. С. 78–95.

25. Рожков А.В., Карева А.С. Способы выставления итоговых оценок за тест. [Электронный ресурс]. URL: <http://docplayer.ru/36035-1-sposoby-vystavleniya-itogovyh-ocenok-za-test.html> (30.01.2018).

26. Болонская система оценивания (баллы ECTS). URL: <http://euroeducation.com.ua/article/40-razlichnaya-topics/55-european-higher-education-system.html> (10.12.2017).

27. Система оценивания знаний [Электронный ресурс] // Википедия. URL: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/434831> (18.01.2018).

28. Аршинский Л.В., Попов А.Ю. Применение технологии экспертных систем для задач агрегированного оценивания на основе среднего арифметического // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51). С. 109–114.

29. Богданов А.А. Очерки организационной науки. Самара: Государственное издательство, 1921 [Электронный ресурс] // Библиотека русской и советской классики. URL:

<http://ruslit.raumlibrary.net/book/bogdanov-ocherki-org/bogdanov-ocherki-org.html#work001> (01.12.2017).

References

1. Arshinskii L.V. Logic axiological approach to assessment of systems. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technology. System analysis. Modeling]. 2013, no. 3 (39), pp. 140–146. (In Russian).

2. Arshinskii L.V. Aggregate method of estimating systems with support of key components. *Ontologiya proektirovaniya* [Ontology of Designing]. 2015, no. 2 (16), pp. 233–245. (In Russian).

<https://doi.org/10.18287/2223-9537-2015-5-2-223-232>

3. Fishbern P. *Teoriya poleznosti dlya prinyatiya reshenii* [Theory of utility for decision-making]. Moscow: Nauka Publ., 1978, 352 p. (In Russian).

4. Postnikov V.M., Spiridonov S.B. Selecting methods of the weighting factors of local criteria. *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Bauman* [Science and Education of the Bauman MSTU]. 2015, no. 06, pp. 267–287. (In Russian).

<https://doi.org/10.7463/0615.0780334>

5. Baranov Yu.G. *Metody prinyatiya upravlencheskikh reshenii* [Methods of making managerial decisions]. Pskov: Pskovskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2013, 176 p. (In Russian).

6. Potapov D.K., Evstaf'eva V.V. *O metodikakh opredeleniya vesovykh koeffitsientov v zadache otsenki*

nadezhnosti kommercheskikh bankov [On the methods of determining weighting factors in the problem of commercial bank reliability evaluation]. *Sbornik nauchnykh statei "Sotsial'no-ekonomicheskoe polozhenie Rossii v novykh geopoliticheskikh i finansovo-ekonomicheskikh usloviyakh: realii i perspektivy razvitiya"* [Collection of scientific articles "Socio-economic status of Russia in new geopolitical and financial-economic conditions: realities and development prospects"]. Saint-Petersburg: Institute of Business and Law Publ., 2008, issue 5, pp. 191–196. (In Russian).

7. Nedosekin A.O. *Otsenka riska biznesa na osnove nechetkikh dannykh* [Fuzzy data-based assessment of business risk]. Saint-Petersburg: Sezam Publ., 2004, 100 p. (In Russian).

8. Madera A.G. *Modelirovanie i prinyatie reshenii v menedzhmente. Rukovodstvo dlya budushchikh top-menedzherov* [Modeling and decision-making in management. A guide for future top managers]. Moscow: LKI Publ., 2010, 688 p. (In Russian).

9. Mikhailov Ya.V. *Upravlencheskie resheniya: posobie dlya upravlentsev-praktikov* [Managerial decisions: a handbook for practical managers]. Moscow: Ekonomika Publ., 2011, 143 p. (In Russian).

10. Nekrest'yanova Yu.N. The theoretical justification of



Pareto's analysis. *Predprinimatel'stvo* [Entrepreneurship]. 2013, no. 3, pp. 56–64. (In Russian).

11. Mityakov E.S., Kornilov D.A. Regarding the issue of proper weighting coefficients in determination of integral indicators of economic dynamics. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* [Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev]. 2011, no. 3 (90), pp. 289–299. (In Russian).

12. Shilin A.I., Koptelova I.A. *Teoriya prinyatiya reshenii v proektirovanii informatsionno-izmeritel'noi tekhniki* [Theory of decision-making in the design of information and measurement equipment]. Volgograd: Volgograd state university Publ., 2012, 128 p. (In Russian).

13. Postnikov V.M., Spiridonov S.B. Approach to the choice of the LAN server upgrade variant. *Nauka i obrazovanie* [Science and Education]. 2013, no. 2, pp. 255–272. (In Russian).

<https://doi.org/10.7463/0213.0535392>

14. Maksakov A.A., Sakulin S.A. Evaluation model for the quality of the enterprise information system's implementation. *Inzhenernyi zhurnal: nauka i innovatsii. Elektronnoe nauchno-tekhnicheskoe izdanie* [Engineering Journal: Science and Innovation. Electronic science and engineering publication.]. 2013, no. 11 (23). Available at: <http://engjournal.ru/articles/1011/1011.pdf> (accessed 10 December 2017).

<https://doi.org/10.18698/2308-6033-2013-11-1011>

15. Bezruk V.M., Ponomarenko N.N., Skorik Yu.V. Efficiency analysis of multicriteria methods for the selection of the preferred version of telecommunications facilities. *Problemy telekommunikatsii* [Telecommunication Problems]. 2015, no. 1 (16), pp. 42–53. (In Russian).

16. Sakulin S.A., Alfimtsev A.N. Selection of user criteria aggregation operators for web page usability evaluation. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 1, pp. 90–102. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-1-90-102>

17. Podinovskii V.V., Podinovskaya O.V. On the theoretical incorrectness of the analytic hierarchy process. *Problemy upravleniya* [Control Sciences]. 2011, no. 1, pp. 8–13. (In Russian).

18. Saati T. *Prinyatie reshenii. Metod analiza ierarkhii* [Decision-making. Method of hierarchy analysis]. Moscow: Radio i svyaz' Publ., 1993, 320 p. (In Russian).

19. Podinovskii V.V., Potapov M.A. Weighted sum method in the analysis of multicriterial decisions: pro et contra. *Biznes-informatika* [Business Informatics]. 2013, no. 3 (25), pp. 41–48. (In Russian).

20. Spiridonov S.B., Bulatova I.G., Postnikov V.M.

Analysis of approaches to the choice of weighting criteria method of pair comparison of criteria. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"* [Science Studies]. 2017, vol. 9, no. 6. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/16TVN617.pdf> (accessed 9 January 2018).

21. Podinovskii V.V., Potapov M.A. Criteria importance in multiple criteria decision making problems: Theory, Methods, Soft and Applications. *Otkrytoe obrazovanie* [Open Education]. 2012, no. 2, pp. 55–61. (In Russian).

22. Saltykov S.A. Experimental comparison of methods of weighted sum, utility theory and criteria importance theory for the solution of multicriterial problems with score criteria. *Upravlenie bol'shimi sistemami*. [Large-Scale Systems Control]. 2010, issue 29, pp. 16–41. (In Russian).

23. Larichev O.I. *Teoriya i metody prinyatiya reshenii, a takzhe khronika sobytii v volshebnykh stranakh* [Theory and methods of decision-making and the chronicle of events in magical countries]. Moscow: Logos Publ., 2008, 392 p. (In Russian).

24. Teslenko V.I. Analysis methods and test results evaluation. *Vestnik Krasnoyarskogo gosudarstvennogo pedagogicheskogo universiteta im. V.P. Astaf'eva* [Bulletin of Krasnoyarsk State Pedagogical University]. 2006, vol. 1, pp. 78–95. (In Russian).

25. Rozhkov A.V., Kareva A.S. *Sposoby vystavleniya itogovykh otsenok za test* [Methods for final grading the test]. Available at: <http://docplayer.ru/36035-1-sposoby-vystavleniya-itogovykh-ocenok-za-test.html> (accessed 30 January 2018).

26. *Bolonskaya sistema otsenivaniya (bally ECTS)* [Bologna evaluation system (ECTS scores)]. Available at: <http://euroeducation.com.ua/article/40-razlichnaya-topics/55-european-higher-education-system.html> (accessed 10 December 2017).

27. *Sistema otsenivaniya znanii* [Grading in education]. Available at: <https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/434831> (accessed 18 January 2018).

28. Arshinskii L.V., Popov A.Yu. Application of technology of expert systems for tasks of aggregate estimation by means of arithmetic mean. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2016, no. 3 (51), pp. 109–114. (In Russian).

29. Bogdanov A.A. *Ocherki organizatsionnoi nauki* [Sketches of organizational science]. Samara: State Publishers, 1921. Available at: <http://ruslit.rau.ru/lib/ruwiki/434831> (accessed 1 January 2017).

Критерии авторства

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

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.421.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-79-83>

ЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ ГЕНЕРАЦИИ СЛУЧАЙНЫХ ВЕЛИЧИН С КУСОЧНО-ЛИНЕЙНЫМИ ПЛОТНОСТЯМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

© Л.Г. Гагарина¹, В.Д. Колдаев², В.Г. Дорогов³, Е.Г. Дорогова⁴, В.В. Слюсарь⁵

Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники»,
124498, Российская Федерация, г. Москва, г. Зеленоград, пл. Шокина, 1.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Повышение эффективности имитационного моделирования в различных предметных областях за счет применения кусочно-линейных функций, позволяющих с высокой точностью определять произвольные случайные величины. **МЕТОДЫ.** Предложено использование кусочно-линейных функций для задания плотности случайных величин в ходе преобразования стандартной случайной величины для построения имитационных моделей. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В зависимости от вида плотности случайных величин, задаваемой кусочно-линейной функцией, предложены три алгоритма в виде последовательности действий для генерации смеси компонентов, на множестве которых задано некоторое дискретное распределение вероятностей. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Применение кусочно-линейных функций благодаря их универсальности позволяет с достаточно высокой точностью генерировать произвольные случайные величины. Высокая эффективность моделирования кусочно-линейных функций позволит повысить точность и адекватность имитационных моделей в различных предметных областях.

Ключевые слова: кусочно-линейная функция, генерация случайных величин, имитационное моделирование, плотность распределения.

Информация о статье. Дата поступления 17 января 2018 г.; дата принятия к печати 28 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Гагарина Л.Г., Колдаев В.Д., Дорогов В.Г., Дорогова Е.Г., Слюсарь В.В. Эффективный алгоритм генерации случайных величин с кусочно-линейными плотностями распределения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 79–83. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-79-83

AN EFFECTIVE GENERATION ALGORITHM OF RANDOM VARIABLES WITH PIECEWISE LINEAR DISTRIBUTION DENSITIES

L.G. Gagarina, V.D. Koldaev, V.G. Dorogov, E.G. Dorogova, V.V. Sliusar

National Research University of Electronic Technology «MIET»,
1 Shokin sq., Zelenograd, Moscow 124498, Russian Federation

¹Гагарина Лариса Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой информатики и программного обеспечения вычислительных систем, e-mail: vslyusar@mail.ru

Larisa G. Gagarina, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Information Science and Computer Software, e-mail: vslyusar@mail.ru

²Колдаев Виктор Дмитриевич, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем, e-mail: vslyusar@mail.ru

Viktor D. Koldaev, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Information Sciences and Computer Software, e-mail: vslyusar@mail.ru

³Дорогов Виктор Георгиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем, e-mail: vslyusar@mail.ru

Viktor G. Dorogov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Information Science and Computer Software, e-mail: vslyusar@mail.ru

⁴Дорогова Екатерина Георгиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем, e-mail: vslyusar@mail.ru

Ekaterina G. Dorogova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Information Science and Computer Software, e-mail: vslyusar@mail.ru

⁵Слюсарь Валентин Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры информатики и программного обеспечения вычислительных систем, e-mail: vslyusar@mail.ru

Valentin V. Sliusar, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Information Science and Computer Software, e-mail: vslyusar@mail.ru



ABSTRACT. The **PURPOSE** of the article is to improve the efficiency of simulation modeling in various subject domains through the use of piecewise linear functions that allow high accuracy in the determination of arbitrary random variables. **METHODS.** It is proposed to use piecewise linear functions to specify the density of random variables under the transformation of a standard random variable to build simulation models. **RESULTS.** Based on the type of the random variable density specified by a piecewise linear function three algorithms of action sequence have been proposed for generating the mixture of the components that must have a defined discrete probability distribution. **CONCLUSION.** Due to their versatility the piecewise linear functions when applied provide sufficiently high generation accuracy of arbitrary random variables. A high simulation efficiency of piecewise-linear functions can improve the accuracy and adequacy of simulation models in different subject domains.

Keywords: *piecewise linear function, generation of random variables, simulation modeling, density distribution*

Information about the article. Received January 17, 2018; accepted for publication February 26, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Gagarina L.G., Koldaev V.D., Dorogov V.G., Dorogova E.G., Sliusar V.V. An effective generation algorithm of random variables with piecewise linear distribution densities. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 79–83. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-79-83

Введение

Генерация случайных величин (СВ) является важной научно-технической задачей, так как при имитационном моделировании существенная часть временных затрат приходится на получение СВ с заданным распределением. Предлагаемый ме-

тод позволяет, после некоторой предварительной обработки, получать значения СВ определенной кусочно-линейной плотности за время, не зависящее от сложности задания функции плотности.

Принципы построения множеств случайных величин при имитационном моделировании

При имитационном моделировании различных процессов возникает необходимость получения (как принято говорить «разыгрывания») значений различных СВ. Эти значения получаются с помощью преобразований стандартной СВ, равномерно распределенной на отрезке $[0,1]$, значения которой в свою очередь получаются с помощью тщательно разработанных датчиков псевдослучайных чисел.

Для некоторых часто встречающихся законов распределения разработаны специальные методы преобразования. Для других приходится использовать универсальные способы вроде метода обратных функций или метода Неймана. При этом объем необходимых вычислений может оказаться значительным, что негативно влияет на эффективность моделирования.

Одним из эффективных способов разыгрывания СВ является смешивание. В состав смеси входят несколько СВ, называемых компонентами смеси, каждой из

которых приписана некоторая вероятность. То есть на множестве компонент задано некоторое дискретное распределение вероятностей. Компоненты и соответствующие вероятности будем обозначать через θ_i, p_i , а смесь этих компонент – через θ .

При разыгрывании значения θ выбирается одна из компонент в соответствии с распределением вероятности и разыгрывается значение этой компоненты. Полученное значение является результатом разыгрывания θ .

Смесь случайных величин имеет плотность распределения, которая является линейной комбинацией их плотностей с коэффициентами, равными соответствующим вероятностям [1].

Если плотность СВ задается кусочно-линейной функцией, то такую плотность можно представить как смесь компонент с треугольными плотностями распределения, то есть такими, график которых представляет собой двухзвенную ломаную линию с



концами, лежащими на оси абсцисс. В дальнейшем такие распределения будем называть треугольниками.

Особенно просто такое представление получается, если кусочно-линейная плотность непрерывна, проекции ее линейных участков на ось X равны и на концах области определения плотность обращается в ноль. В этом случае кусочно-линейная функция равна сумме равнобедренных треугольников, вершины которых лежат в вершинах ломаной, а основания равны удвоенной проекции линейного участка (рис. 1). При этом площадь треугольника пропорциональна вероятности, с которой соответствующая компонента входит в смесь.

Получить значение случайной величины с равнобедренно-треугольной плотностью распределения можно с помощью простых преобразований из двух стандартных СВ [2]. Например, если ξ_1 и ξ_2 независимы и равномерно распределены на отрезке $[0, 1]$, то СВ $a(\xi_1 - \xi_2) + b$ имеет равнобедренно-треугольную плотность на отрезке $[b - a, b + a]$, а СВ $a(\xi_1 + \xi_2) + b$ имеет равнобедренно-треугольную плотность на отрезке $[b, b + 2a]$.

Пусть $f_\theta(x)$ – кусочно-линейная плотность, сосредоточенная на отрезке $[x_0, x_{n+1}]$ и удовлетворяющая вышеуказан-

ным требованиям, т.е.

$$f_\theta(x_0) = 0, f_\theta(x_{n+1}) = 0, f_\theta(x_i) = p_i,$$

$$\text{где } x_i = x_0 + \Delta \cdot i (i = 1, \dots, n), \Delta = \frac{x_{n+1} - x_0}{n+1}.$$

Для разыгрывания θ нужно выполнить следующие действия:

- разыграть i в соответствии с распределением $\{p_i\}$;
- разыграть стандартные ξ_1 и ξ_2 ;
- вычислить $\theta = x_i + (\xi_1 - \xi_2) \cdot \Delta$.

На первом шаге требуется определить такое i , чтобы выполнялось отношение

$$p_1 + \dots + p_{i-1} < \xi < p_1 + \dots + p_i.$$

Зачастую для этой цели осуществляется последовательный перебор значений i начиная с 1. Но разыгрывание СВ с дискретным распределением можно осуществить более эффективно.

Предположим, что вероятности p_i кратны величине p , то есть $p_i = k_i p$, где k_i – целые числа. Тогда распределение $\{p_i\}$ можно задать массивом, в котором значение i записано k_i раз. Для этого потребуется массив $M [0, \dots, k-1]$ из $k = \sum k_i$ элементов. Разыгрывание i можно осуществить с помощью простого расчета по формуле

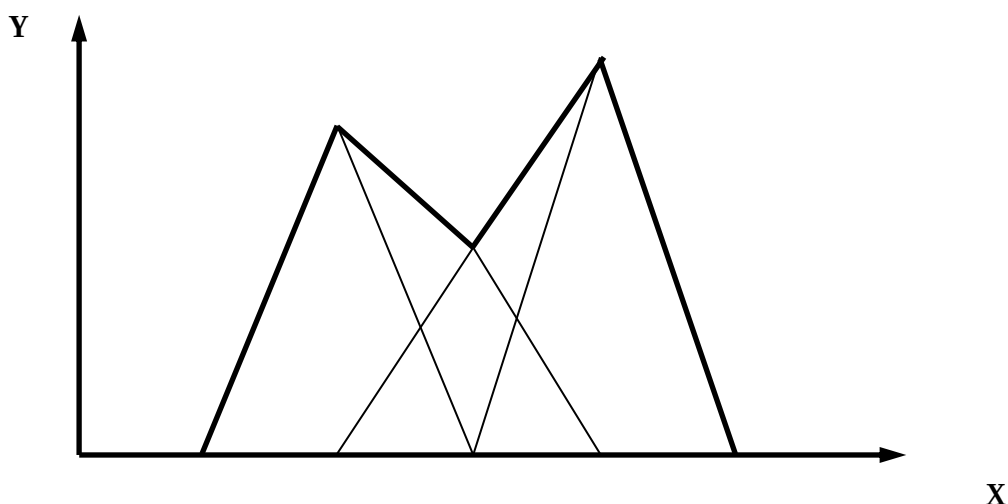


Рис. 1. Пример графика непрерывной кусочно-линейной функции с нулевыми значениями границ области определения (задается внутри «многоугольника»)

Fig. 1. Example of the graph of the continuous piecewise linear function with zero values of definition domain boundaries (specified inside the "polygon")

$$i = M[\text{int}(k\xi)],$$

где ξ – стандартная СВ; $\text{int}(x)$ – целая часть x .

Значение k обычно бывает небольшим. Так, при задании вероятностей с точностью до двух десятичных знаков k будет не более 100. Если же задание распределения с помощью массива нежелательно, то можно применить какой-либо другой способ повышения эффективности.

Например, пусть $r = \min(p_i), r_i = p_i - r$. Тогда СВ с распределением $\{p_{ij}\}$ можно считать смесью СВ с равновероятными значениями от 1 до n и СВ с распределением $\{\gamma r_i\}$,

где $\gamma = \frac{1}{\sum r_i}$ – нормирующий множитель.

Вероятности компонентов смеси равны nr и $(1-nr)$.

Если вероятности p_i не сильно различаются, с высокой вероятностью будет требоваться тривиальное разыгрывание равномерно распределенной СВ, и эффективность процедуры будет высокой. При необходимости к распределению $\{\gamma r_i\}$

можно применить тот же прием. Для удобства вычислений нумерацию значений СВ следует выбирать так, чтобы минимальное значение вероятности оказалось последним.

Для представления произвольной кусочно-линейной плотности, т.е. не имеющей указанных выше ограничений, можно применить способ, для которого требуется по две треугольные компоненты на каждый линейный участок [3]. График линейного участка представляет собой трапецию с основаниями a и b , концы которых соединены наклонной боковой стороной. Высота трапеции – Δ . СВ с такой плотностью распределения представляется смесью двух прямоугольных треугольников: один – с катетами a и Δ , другой – с катетами Δ и b . Вероятности компонент пропорциональны площадям этих треугольников (рис. 2).

Для каждой компоненты нужно запомнить координату прямого угла x_i и длину катета Δ_i . При этом, если прямой угол треугольника лежит на правом конце катета Δ_i , то длина должна быть со знаком минус. Нумерация компонент совершенно произвольная.

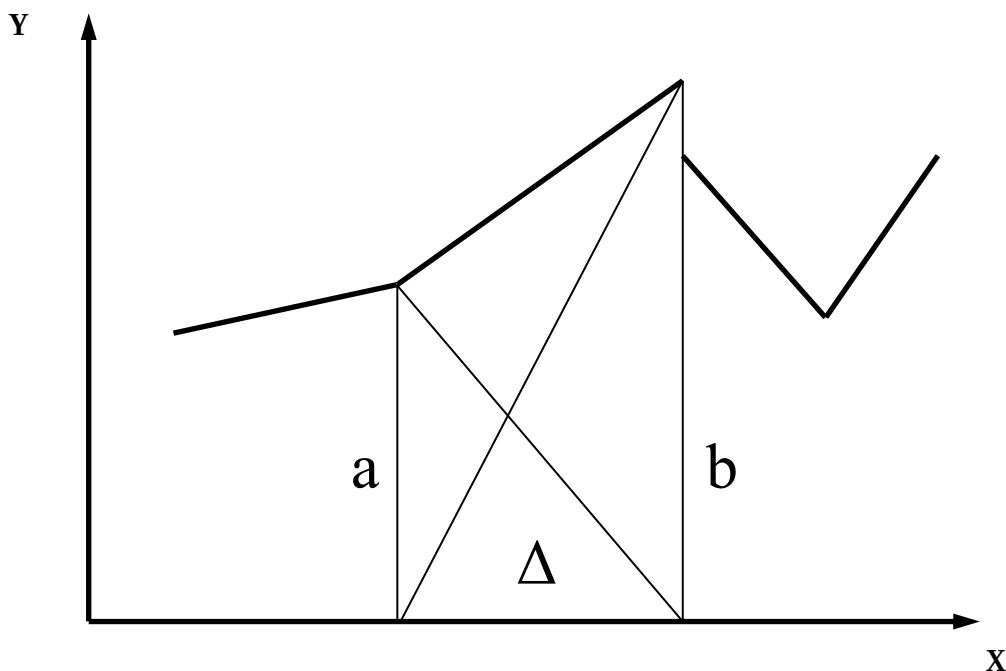


Рис. 2. Пример представления произвольной кусочно-линейной плотности
Fig. 2. Example of arbitrary piecewise linear density representation



Разыграть СВ, распределенную на отрезке $[0..1]$ и имеющую прямоугольно-треугольную плотность с прямым углом в точке 0, можно по формуле

$$\theta = \text{abs}(\xi_1 - \xi_2).$$

Для разыгрывания θ , имеющей кусочно-линейную плотность, состоящую из N кусков, нужно вычислить параметры $2N$ компонент $p_i, x_i, \Delta_i (i=1, \dots, 2N)$ и выполнить следующие действия:

- разыграть i в соответствии с распределением $\{p_i\}$;
- разыграть стандартные ξ_1 и ξ_2 ;
- вычислить $\theta = x_i + \text{abs}(\xi_1 - \xi_2) \cdot \Delta_i$.

Другой способ представления про-

извольной кусочно-линейной плотности требует одну компоненту на каждый линейный участок, графиком плотности которой является упомянутая выше трапеция с вероятностью компоненты, равной площади трапеции. Если случайная точка будет равномерно распределена в этой трапеции, то абсцисса точки будет иметь требуемое распределение вероятностей. Таким образом, для разыгрывания СВ необходимо выполнить следующие действия (без потери общности, считаем $a+b=1$):

- разыграть i в соответствии с распределением $\{p_i\}$;
- разыграть стандартные ξ_1 и ξ_2 ;
- вычислить $\theta = x_i + \xi_1 \cdot \Delta_i$, если $\xi_2 > b_i \xi_1 + a_i(1 - \xi_1)$, или $\theta = x_i + (1 - \xi_1) \cdot \Delta_i$.

Выводы

Таким образом, благодаря универсальности кусочно-линейных функций их применение позволяет с достаточно высокой точностью приближать произвольные случайные величины. Высокая эффектив-

ность моделирования кусочно-линейных функций позволит повысить точность и адекватность имитационных моделей в различных предметных областях.

Библиографический список

1. Лоу А.М., Кельтон В.Д. Имитационное моделирование. 3-е изд. СПб.: Питер, 2004. 848 с.
2. Дорогов В.Г., Гагарина Л.Г. Некоторые аспекты оптимизации прикладных задач при имитационном моделировании процесса производства интегральных схем // Оборонный комплекс – научно-

- техническому прогрессу России. 1999. № 1-2. С. 40–46.
3. Хлопков Ю.И., Горелов С.Л. Приложение методов статистического моделирования (Монте-Карло) (учебное пособие) // Международный журнал экспериментального образования. 2015. № 2-2. С. 242–243.

References

1. Lou A.M., Kel'ton V.D. *Imitatsionnoe modelirovanie* [Simulation Modeling]. Sankt-Peterburg: Piter Publ., 2004, 848 p.
2. Dorogov V.G., Gagarina L.G. Some aspects of applied tasks optimization under simulation modeling of integrated circuits production // *Oboronnyi kompleks – nauchno-tehnicheskomu progressu Rossii* [Defense

- industry achievements – Russian scientific and technical progress]. 1999, no. 1-2, pp. 40–46. (In Russian)
3. Khlopkov Yu.I., Gorelov S.L. Application of statistical modeling techniques (Monte Carlo method) (Learning aids) // *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya* [International Journal of Experimental Education]. 2015, no. 2-2, pp. 242–243. (In Russian)

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 65.011.56+691.237.33

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-84-92>

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЯЧЕИСТОГО БЕТОНА

© С.В. Леонтьев¹, А.Д. Курзанов², Р.В. Радыгин³

Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
614990, Российская Федерация, г. Пермь, Комсомольский пр-кт, 29.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ данной работы – исследовать уровень автоматизации технологических линий, на которых осуществляется выпуск изделий из ячеистого бетона. **МЕТОДЫ.** Исследование проводилось на основе изучения научно-технической литературы по рассматриваемой проблематике. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В настоящее время автоматизированные системы управления (АСУ) процессом производства ячеистого бетона представляют собой двухуровневые системы: верхний уровень включает автоматизированные рабочие места операторов, нижний – микроконтроллеры и исполнительные механизмы. Взаимодействие уровней осуществляется посредством локальных сетей. Решения по управлению процессом принимаются техническим персоналом, что влечет за собой ряд существенных недостатков, таких как, например, невозможность учета всех воздействующих факторов. На лицо, принимающее решение (ЛПР), возлагается огромная ответственность за правильность принимаемых решений. Авторами настоящей работы предлагается включить в контур управления систему поддержки принятия решений (СППР), которая позволит повысить качество принимаемых решений в условиях неопределенности. **ВЫВОДЫ.** Установлено, что применяемые методы управления технологическим процессом производства ячеистого бетона не отвечают современным требованиям выпуска продукции стабильно высокого качества. На основании выполненного анализа сформулированы требования к проектируемой системе управления процессом производства изделий из неавтоклавного газобетона, способной устранить существующие недостатки.

Ключевые слова: ячеистый бетон, неавтоклавный газобетон, система управления, качество продукции, автоматизация технологических процессов, автоматизированная система управления.

Информация о статье. Дата поступления 12 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 26 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Леонтьев С.В., Курзанов А.Д., Радыгин Р.В. Современные системы автоматизации предприятий по производству ячеистого бетона // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 84–92. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-84-92

MODERN AUTOMATION SYSTEMS FOR CELLULAR CONCRETE PRODUCING ENTERPRISES

S.V. Leontiev, A.D. Kurzanov, R.V. Radygin

Perm National Research Polytechnic University,
29 Komsomolsky pr., Perm, 614990, Russian Federation

CONCLUSIONS. It has been determined that the applied control methods of cellular concrete production process do not meet modern requirements of consistent high quality product manufacturing. The requirements for a new control system for non-autoclaved aerated concrete products manufacturing are formulated on the basis of the performed analysis. The designed system will eliminate the existing shortcomings. **ABSTRACT.** The **PURPOSE** of the paper is to study the automation level of production lines used for cellular concrete products manufacturing. **METHODS.** The research was car-

¹Леонтьев Степан Васильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, e-mail: n1306cl@yandex.ru

Stepan V. Leontiev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Construction Engineering and Materials Sciences, e-mail: n1306cl@yandex.ru

²Курзанов Александр Дмитриевич, старший преподаватель кафедры строительного инжиниринга и материаловедения, e-mail: kurzanov_sm_st@mail.ru

Alexander D. Kurzanov, Senior Lecturer of the Department of Construction Engineering and Materials Sciences, e-mail: kurzanov_sm_st@mail.ru

³Радыгин Роман Викторович, студент, e-mail: romaroma18129579@gmail.com

Roman V. Radygin, Student, e-mail: n1306cl@yandex.ru



ried out based on the study of scientific and technical literature on the problem under consideration. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Today automated control systems of cellular concrete production process have two-levels. The upper level includes the workstations of operators while the lower level consists of microcontrollers and actuators. The levels interact through local networks. Technical staff generate control solutions which causes a number of critical flaws, such as, failures to take account of all influencing factors. A great responsibility for correct decisions rests with decision-makers. The authors of this article suggest a decision support system to be included in the control loop which will improve the quality of the decisions made under uncertainty.

Keywords: *cellular concrete, non-autoclaved aerated concrete, control system, product quality, automation of technological processes, automated control system*

Information about the article. Received February 12, 2018; accepted for publication February 26, 2018; available online March 31, 2018.

For citation: Leontiev S.V., Kurzanov A.D., Radygin R.V. Modern automation systems for cellular concrete producing enterprises. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 84–92. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-84-92

Введение

Отрасль производства строительных материалов – динамично развивающееся направление в промышленности страны. Особое положение в условиях принятой концепции ресурсо- и энергосбережения занимает ячеистый бетон как эффективный с точки зрения теплозащиты материал. Развитие технологий производства

ячеистого бетона предопределяет появление наряду с крупными комбинатами предприятий средней и малой мощности, отличающихся применяемым оборудованием, технологией производства, а также реализованным уровнем управления технологическим процессом производства (ТПП).

Обзор ключевых публикаций

В настоящее время на предприятиях, специализирующихся на производстве изделий из ячеистого бетона, выделяют несколько уровней автоматизации технологических процессов⁴:

1. Низший, или контроллерный, уровень автоматизации образуется промышленными микроконтроллерами, связанными с датчиками и исполнительными механизмами, расположенными непосредственно на технологической установке. Этот уровень предусматривает непрерывный автоматический контроль и регулирование отдельных параметров того или иного процесса либо агрегата, а также обеспечивает возможность дистанционного управления исполнительными механизмами и телесигнализации об отклонении параметров процессов от нормы и т.д.

2. Средний уровень автоматизации

(оперативный уровень) включает автоматизированные рабочие места (АРМ) операторов и диспетчеров, размещенные в офисных помещениях, снабженные человеко-машинным интерфейсом и соединенные локальной сетью с контроллерами низшего уровня. АРМ оперативного уровня реализует отображение в графическом виде интересующей оператора технологической информации, в необходимых случаях обеспечивает выдачу оператору аварийных сигналов и передачу контроллерам низшего уровня прямых управляющих воздействий. АРМ могут быть как универсальными, предоставляющими доступ ко всем возможностям производственной системы, так и технологически ориентированными, учитывающими специфику задач, решаемых персоналом на конкретном участке производства.

⁴Абдулин С.Ф. Системы автоматизации предприятий стройиндустрии: учеб. пособие. Омск: Изд-во СибАДИ, 2007. 643 с. / Abdulin S.F. Automation system of enterprises: Learning aids. Omsk: SibADI Publ., 2007, 643 p.



3. Высший уровень автоматизации ориентирован на решение аналитических и прогностических задач. На данном уровне реализуется полная автоматизация планирования и управления всеми сторонами технологического процесса, обеспечивающая рационализацию, а в пределе – оптимизацию этого процесса. Наличие этого уровня превращает производство в гибкую автоматизированную производственную систему, отличительной особенностью которой, в соответствии с нормативной документацией⁵, является возможность автоматической перенастройки параметров технологического процесса при изменении условий производства.

В зависимости от реализованного уровня автоматизации, а также с учетом сложности технологического процесса качество выпускаемого на предприятии готового продукта может существенно варьироваться.

Газобетон автоклавного твердения производится на крупных комбинатах, оснащенных высокосложным широкоменклатурным оборудованием. Технологический процесс на них полностью автоматизирован, а роль человека сводится к наблюдению за процессом.

Предприятия по выпуску неавтоклавного газобетона (НГБ) характеризуются существенно меньшей степенью автоматизации [1, 2]. На таких предприятиях автоматизированы отдельные операции (например, полностью автоматизирован дозирочно-смесительный комплекс), однако общая координация процесса, а также целый ряд отдельных операций (в частности, транспортировка) осуществляются технологами и рабочими.

В ряде отечественных и зарубежных исследовательских институтов в сотрудничестве с промышленными предприятиями

предпринимаются попытки повысить уровень автоматизации современного производства. Исследования ведутся в двух принципиально различных направлениях, первое из которых состоит в снижении доли ручных операций как основных, так и вспомогательных, а второе – в исключении людей из процесса принятия управленческих решений и возложения решения высокоуровневых задач на средства интеллектуализации производства [2].

В работе [3] представлено описание комплексных технологических систем для заводов, производящих ячеистый бетон, с введением их в состав унифицированной системы контроля и адаптивного управления технологическим процессом (АСКУ). Основным звеном, определяющим качество получаемых из газобетона изделий, является матрица (рецептура) дозирования исходных компонентов, учитывающая свойства сырья и параметры технологического процесса (ТП).

Недостатком такой системы является ее зависимость от информации о входных параметрах процесса (например, о свойствах исходного сырья), которая является основой назначения рецептурно-технологических параметров (РТП). Кроме того, в системе предусмотрен контроль качества готовой продукции, что в некоторой степени снижает оперативность фиксации отклонений и замедляет процесс принятия контрмер.

В настоящее время известны разработки компаний IT-сферы в области создания различных информационных систем (ИС) для внедрения их на заводах, производящих ячеистый бетон. Так, предложена программа «Система управления производственным процессом – АГБ» (СУПП–АГБ) [4]. Данный программный продукт предназначен для сбора данных о

⁵ГОСТ 26228-90. Системы производственные гибкие. Термины и определения. Номенклатура показателей; утв. и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по управлению качеством продукции и стандартам от 07.06.1990 г. № 1448. М.: Изд-во Стандартов, 1990 / GOST 26228-90. Flexible manufacturing systems. Terms and definitions, List of indices: approved and introduced by the Resolution of the USSR State Committee on Quality Management and Standards of 7 June 1990 No. 1448. Moscow: Standards Publ., 1990.



производстве ГБ, их архивирования и анализа. СУПП-АГБ состоит из пяти основных разделов, каждый из которых затрагивает определенный аспект производства продукции: производство, оборудование, движение продукции, качество продукции, управление.

Развитием данной ИС является разработка второго поколения программы, получившей название «Технолог АГБ» [5, 6], имеющей следующие функциональные возможности:

- ведение электронных журналов;
- осуществление автоматизированных расчетов;
- статистическая обработка и комплексный анализ данных.

Несмотря на несомненные преимущества программы «Технолог АГБ», такие как возможность выбора контролируемых параметров, быстрый ввод данных, проверка их корректности и хранение данных в едином месте, составление отчетов и другое, она имеет очевидный недостаток: данная ИС не может в автоматизированном режиме выводить и формулировать рекомендации по повышению качества выпускаемой продукции, а позволяет лишь отслеживать текущее состояние процесса. В лучшем случае персонал будет проинформирован о падении качества ниже заданного уровня. Данный недостаток может быть спроецирован на все известные ИС, реализованные на предприятиях по выпуску газобетона.

В работе [7] представлена автоматизированная система, в основу которой положен экспресс-метод, позволяющий контролировать процесс пластического упрочнения газобетонного сырца с целью определения величины пластической прочности, обеспечивающей бездефектную резку массива, и прогнозировать величину отпусной прочности газобетонных блоков. Данная система в совокупности с приборным обеспечением позволяет автоматизировать рутинные ручные операции, что повышает качество их исполнения, а также позволяет повысить оперативность получения данных о качестве готового продукта,

пусть и несущих прогностический характер. Недостатком системы мониторинга вспучивания и упрочнения газобетона является отсутствие выстроенной взаимосвязи между результатом структурообразования и рецептурой исходной смеси.

В работе [8] представлена концепция автоматической системы коррекции рецептуры ячеистобетонной смеси. Данная концепция включает в себя алгоритм и структуру системы управления, суть которой заключается в изменении расхода извести, горячей и холодной воды на основе данных о тепловыделении вспучивающегося массива предыдущего цикла производства с целью обеспечения оптимального газообразования. Недостатком такой системы является невозможность ее применения на заводах, производящих НГБ, при условии замены извести на каустическую соду.

В статье [9] предложена программа для ЭВМ «Ячеистый бетон – 2007» для расчета состава ячеистого бетона, автоматически выполняющая коррекцию рецептуры (расхода извести) в зависимости от ее тепловыделения.

В работе [10] предложено управление производством газобетона на основе использования пакета Microsoft Project Expert, обладающего полным набором необходимых для управления функций. Однако такое управление должно быть отнесено в первую очередь к автоматизированному управлению предприятием.

В работе [11] представлена автоматизированная система контроля температуры заливаемой смеси: температура всех используемых материалов измеряется с помощью специальных датчиков. После этого рассчитывается необходимое количество подаваемой в смеситель холодной и горячей воды. Целевое значение заливочной температуры смеси задается техническим персоналом.

В ряде работ изложены результаты попыток построения математических моделей процессов дозирования компонентов газобетона и других процессов производства ГБ, а также представлены алгоритмы

оптимального управления этими процессами [12–16]. Однако на практике предложен-

ные модели и алгоритмы не реализованы.

Результаты исследования и их обсуждение

На основании приведенного анализа, а также с учетом представленной выше классификации можно сделать вывод, что на заводах, производящих НГБ, реализован низший уровень автоматизации.

Данный уровень автоматизации целесообразен и экономически оправдан при условии стабильности свойств исходного сырья, когда подобран оптимальный режим ТП с учетом всех параметров. При этом обеспечивается выпуск продукции требуемого качества в течение длительного периода времени. Однако стабильное состояние процесса выпуска газобетона – крайне редкое явление, что объясняется множеством причин. В случае изменения входных параметров процесса качество продукции незамедлительно падает, вплоть до появления брака; при этом параметры технологии требуют незамедлительной корректировки в соответствии с изменившейся ситуацией.

Таким образом, несмотря на определенные успехи в области автоматизации процесса производства газобетона функция принятия управленческих решений (УР), касающихся изменения состава смеси, а также значений отдельных технологических параметров, возложена на технический персонал – технологов, операторов, то

есть лиц, принимающих решения (ЛПР). Принципиальная схема формирования и реализации управленческих решений представлена на рис. 1.

Указанный подход к формированию управленческих решений имеет существенные недостатки:

1) ЛПР должно обладать уникальными знаниями условий производства применительно к конкретному региону, а также необходимым практическим опытом, а в условиях дефицита квалифицированных кадров принимаемые УР априори не могут быть эффективными;

2) в условиях реального производства ЛПР в процессе формирования УР необходимо принимать во внимание значительное число факторов, большинство из которых переменны; даже использование средств вычислительной техники в текущем их применении не позволяет производственному персоналу адекватно оценить сложившуюся ситуацию с учетом всех аспектов производства;

3) отсутствует единая методика оптимизации РТП при понижении качества готового продукта ниже определенного уровня вследствие вариации входных параметров либо существенного воздействия неконтролируемых возмущений.

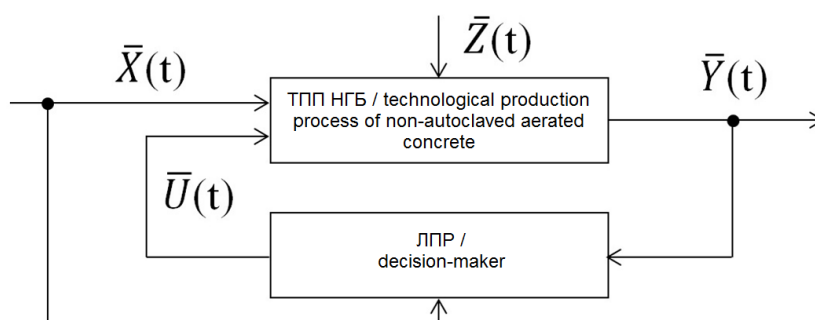


Рис. 1. Система управления ТП, замкнутая через лицо, принимающее решение

$\bar{X}(t)$ – вектор входных параметров процесса; $\bar{Z}(t)$ – вектор возмущающих параметров;

$\bar{U}(t)$ – вектор управляющих воздействий; $\bar{Y}(t)$ – вектор выходных характеристик процесса)

Fig. 1. Control system of a technological process implemented through a decision maker ($\bar{X}(t)$ – vector of input process parameters; $\bar{Z}(t)$ – vector of perturbation parameters; $\bar{U}(t)$ – vector of control parameters; $\bar{Y}(t)$ – vector of process output characteristics)



В условиях сложного многостадийного процесса производства изделий из НГБ система управления ТПП должна отвечать современным требованиям оперативного управления. С учетом выявленных недостатков могут быть сформулированы требования к системе управления и ее функционалу, при соблюдении которых она обеспечит выпуск продукции, удовлетворяющей предъявленным требованиям по качеству:

- система должна позволять персоналу контролировать показатели качества не только готового продукта по завершению цикла производства, но и отдельные параметры ячеистобетонного массива на всех стадиях ТПП;

- при корректировке РТП должны быть учтены как свойства используемого сырья, так и свойства готовых изделий, выпущенных в ходе уже завершившихся производственных циклов с его использованием;

- при формировании предложений по адаптации РТП к быстроменяющимся условиям в качестве исходной информации должны быть выбраны несколько комплексно учитываемых свойств готового продукта исходя из функционального назначения будущего материала;

- система не должна ограничиваться лишь одним подходом к поиску оптимального набора РТП (например, экспертным методом или аналитическим методом поиска экстремума), а использовать рациональное сочетание известных методов;

- в системе должен быть реализован дружественный интерфейс, позволяющий даже неподготовленному персоналу получать необходимую информацию на профессиональном подмножестве естественного языка;

- система по результатам уже выработанных управленческих решений должна накапливать знания и опыт и на их основе повышать качество своего собственного функционирования;

- в случае возникновения предпосылок аварийной ситуации или ее развития система должна осуществлять их распознавание и либо подавать сигналы производственному персоналу, либо (в необходимых случаях) принудительно останавливать ТПП.

Таким образом, для эффективного управления адаптацией ТПП НГБ к меняющемуся качеству сырья и в условиях недостаточной квалификации ЛПР необходимо включить в контур управления дополнительный компонент – систему поддержки принятия управленческих решений (СППР), которая должна стать частью общей системы управления и дополнить человеческую компетентность компетентностью машинной. Задача СППР состоит в формировании предложений по внесению изменений в РТП, предъявляемых ЛПР, которые тот может принять, но может и отвергнуть. СППР должна вырабатывать альтернативные варианты управленческих решений в случае, если протекание ТПП НГБ отклоняется от некоторого оптимального сценария его реализации (рис. 2).

Функционирование СППР должно происходить в условиях дискретно-непрерывного производства. Каждый следующий производственный цикл начинается, в случае необходимости, с изменения уставок контроллеров, отвечающих за дозирование ингредиентов сырья и поддержание других параметров, после чего осуществляются дальнейшие стадии ТП. По окончании цикла фиксируются отклонения показателей качества НГБ от заданных значений. Допущение, делающее реализацию рассматриваемого подхода возможным, состоит в том, что предложения по внесению изменений в ТПП СППР формирует и передает ЛПР по результатам уже закончившегося производственного цикла, и корректирующие воздействия на уставки контроллеров, призванные парировать факторы снижения качества, будут реализованы только в новом производственном цикле.

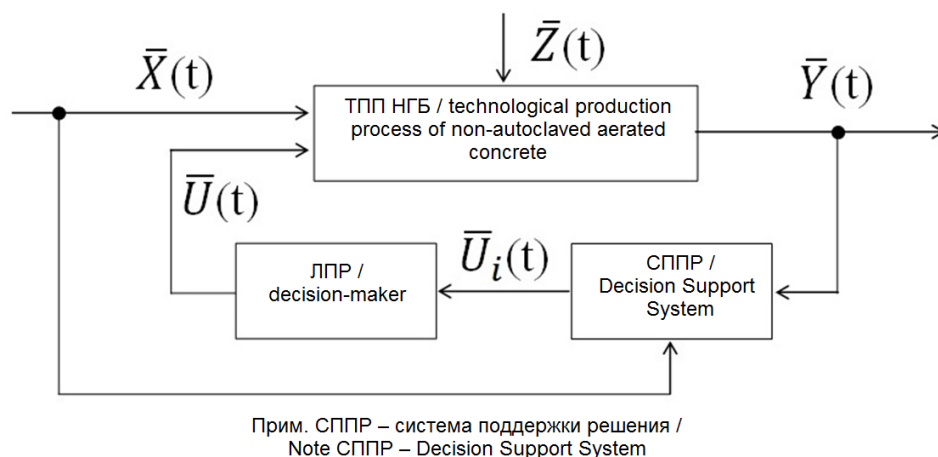


Рис. 2. Схема предлагаемой системы управления, где $\bar{X}(t)$ – вектор входных параметров процесса; $\bar{Z}(t)$ – вектор возмущающих параметров; $\bar{U}(t)$ – вектор управляющих воздействий; $\bar{Y}(t)$ – вектор выходных характеристик процесса

Fig. 2. Diagram of the proposed control system, where $\bar{X}(t)$ – vector of input process parameters; $\bar{Z}(t)$ – vector of perturbation parameters; $\bar{U}(t)$ – vector of control parameters; $\bar{Y}(t)$ – vector of process output characteristics

Заключение

На основании изложенных требований должна быть спроектирована и реализована система управления процессом производства неавтоклавного газобетона в условиях сырья нестабильного качества, которая обеспечит высокую скорость отладки технологических параметров при изменении входных параметров процесса, а также поддержание стабильного качества выпускаемых изделий в условиях незначи-

тельной вариации характеристик поступающего на производство сырья.

Система должна отвечать условиям возможной интеграции в существующую информационную сеть предприятия посредством введения дополнительных датчиков непосредственно на технологической линии и установкой специализированного ПО на рабочем месте оператора.

Библиографический список

1. Титов В.А., Малых Б.В., Миренбург Я.М. Мини-завод мелких стеновых блоков из неавтоклавного ячеистого бетона // Строительные материалы. 1994. № 7 (475). С. 17–18.
2. Гончарик В.Н. АСУТП производства строительных изделий из ячеистого силикатобетона // Строительные материалы. 1992. № 10 (454). С. 14–18.
3. Селезский А.И., Садыков А.И., Одинцов А.И., Гизатулин Р.А. Повышение качества строительных изделий из газобетона в условиях поточного производства // Строительные материалы. 2006. № 6 (618). С. 12–13.
4. Тонкушин А.А. Система управления производственным процессом для предприятий, производящих автоклавный газобетон // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 8-й Междунар. науч.-практ. конф. (Минск – Могилев, 11–13 июня 2014 г.). Минск: Изд-во НП ООО «Стринко», 2014. С. 40–42.
5. Тонкушин А.А. Программа «Технолог АГБ» как инструмент повышения эффективности технологической службы // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 9-й Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 18–19 мая 2016 г.). Минск: Колоград, 2016. С. 91–94.
6. Глебов Б.А. Информационные технологии в помощь технологу АГБ // Современный автоклавный газобетон: сб. докл. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 9–11 сентября 2015 г.). СПб.: Изд-во НАОГ, 2015. С. 22–25.
7. Гольдман Ф.А., Штакельберг Д.И., Гадаев Н.Р., Штейнбук Г.Е. Опыт технологического мониторинга вспучивания и упрочнения газобетона // Современный автоклавный газобетон: сб. докл. науч.-практ. конф. (Санкт-Петербург, 9–11 сентября 2015 г.). СПб.: Изд-во НАОГ, 2015. С. 47–52.
8. Галицков К.С., Галицков С.Я., Шломов С.В. Алгоритм и система автоматической коррекции рецепту-



ры ячеистобетонной смеси // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2011. № 4 (32). С. 219–221.

9. Шумков А.И. Программа «Ячеистый бетон – 2007» для расчета состава ячеистого бетона // Технологии бетонов. 2007. № 4. С. 56–57.

10. Ефименко А.З., Пилипенко А.С., Илларионов И.А. Использование пакета Microsoft Project Expert для управления проектами предприятий стройиндустрии // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2012. № 10 (165). С. 12.

11. Рудченко Д.Г. Модернизация завода автоклавного ячеистого бетона на примере ОАО «Аэрок Обухов» // Опыт производства и применения ячеистого бетона автоклавного твердения: материалы 6-й Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 26–28 мая 2010 г.). Минск: Изд-во НП ООО «Стринко», 2010. С. 32–37.

12. Кулинич Э.М., Зиновкин В.В., Крисан Ю.А., Арсеньева С.И. Моделирование автоматизированного управления многокомпонентным дозированием технологического процесса приготовления газобетона // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут": Серія «Нові

рішення у сучасних технологіях». 2010. № 57. С. 271–277.

13. Кулинич Э.М. Моделирование процесса приготовления возвратного шлама из технологических отходов производства газобетона // Проблеми інформаційних технологій. 2013. № 3. С. 62–66.

14. Кулинич Э.М. Математическая модель автоматизированного управления дозированием жидких компонентов технологического процесса приготовления газобетона // Електромеханічні системи, методи оптимізації та моделювання. 2015. № 2. С. 31–38.

15. Зиновкин В.В., Кулинич Э.М., Байша А.И., Мирный В.О. Оптимальное управление многопараметрическим технологическим процессом приготовления газобетона // Автоматизація, моделювання та методи оптимізації. Електромеханічні енергозберігаючі системи. 2012. № 3. С. 383–385.

16. Зиновкин В.В., Кулинич Э.М. Многопараметрическая система автоматизированного управления технологическим процессом приготовления газобетона // Східно-Європейський журнал передових технологій. 2009. № 3/3 (39). С. 38.

References

1. Titov V.A., Malykh B.V., Mirenborg Ya.M. Mini-plant of small building blocks made of non-autoclaved aerated concrete. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 1994, no. 7 (475), pp. 17–18. (In Russian).

2. Goncharik V.N. A CAD manufacturing of cellular silicate concrete building products. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 1992, no. 10 (454), pp. 14–18. (In Russian).

3. Selezskii A.I., Sadykov A.I., Odintsov A.I., Gizzatulina R.A. Improving the quality of aerated concrete products under conditions of flow production. *Stroitel'nye materialy* [Building materials]. 2006, no. 6 (618), pp. 12–13. (In Russian).

4. Tonkushin A.A. *Sistema upravleniya proizvodstvennym protsessom dlya predpriyatii, pro-izvodyashchikh avtoklavnyi gazobeton* [Flow process control system for enterprises producing autoclaved aerated concrete]. *Materialy 8-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Opyt proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona avtoklavnogo tverdeniya"* [Materials of 8th International Scientific and Practical Conference "Experience in autoclaved aerated concrete production and application"]. Minsk: Strinko Publ., 2014, pp. 40–42.

5. Tonkushin A.A. *Programma «Tekhnolog AGB» kak instrument povysheniya effektivnosti tekhnologicheskoi sluzhby* ["AAC Technologist" software as a tool to improve the efficiency of technological service]. *Materialy 9-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Opyt proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona avtoklavnogo tverdeniya"* [Materials of 9th International Scientific and Practical Conference "Experience in autoclaved aerated concrete production and application"]. Minsk: Kolograd Publ., 2016, pp. 91–94.

6. Glebov B.A. *Informatsionnye tekhnologii v pomoshch' tekhnologu AGB* [Information technologies in aid of an AAC production engineer]. *Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennyyi avtoklavnyi gazobeton"* [The book of reports of the Scientific and Production conference "Modern autoclaved aerated concrete"]. Saint-Petersburg: NAAG Publ., 2015, pp. 22–25. (In Russian).

7. Gol'dman F.A., Shtakel'berg D.I., Gadaev N.R., Shteinbuk G.E. *Opyt tekhnologicheskogo monitoringa vspuchivaniya i uprochneniya gazobetona* [Experience of technological monitoring of aerated concrete bloating and hardening]. *Sbornik dokladov nauchno-prakticheskoi konferentsii "Sovremennyyi avtoklavnyi gazobeton"* [The book of reports of the scientific and practical conference "Modern autoclaved aerated concrete"]. Saint-Petersburg: NAAG Publ., 2015, pp. 47–52. (In Russian).

8. Galitskov K.S., Galitskov S.Ya., Shlomov S.V. Algorithm and system of automatic correction of the compounding of the cellular-concrete mix. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Vestnik of Samara State Technical University. Technical Sciences Series]. 2011, no. 4 (32), pp. 219–221. (In Russian).

9. Shumkov A.I. Program "Cellular concrete – 2007" for aerated concrete composition calculation. *Tekhnologii betonov* [Concrete technologies]. 2007, no. 4, pp. 56–57. (In Russian).

10. Efimenko A.Z., Pilipenko A.S., Illarionov I.A. Use of Microsoft Project Expert for construction industry enterprise projects management. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka* [Construction materials,



equipment, technologies of XXI century]. 2012, no. 10 (165), pp. 12. (In Russian).

11. Rudchenko D.G. *Modernizatsiya zavoda avtoklavnogo yacheistogo betona na primere OAO «Aerok Obukhov»* [Modernization of the autoclaved aerated concrete plant on the example of "Aerok Obukhov" JSC]. *Materialy 6-i Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Opyt proizvodstva i primeneniya yacheistogo betona avtoklavnogo tverdeniya"* [Materials of 9th International Scientific and Practical Conference "Experience in autoclaved aerated concrete production and application"]. Minsk: Strinko Publ., 2010, pp. 32–37.

12. Kulinich E.M., Zinovkin V.V., Krisan Yu.A., Arsen'eva S.I. Simulation of automated control of multi-component batching and technological process of aerated concrete production. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "Kharkivs'kii politekhnichnii institut". Seriya "Novi rishennya u suchasnikh tekhnologiyakh"* [Bulletin of the National Technical University "Kharkov Polytechnic Institute". Series: "New solutions in modern technologies"]. 2010, no. 57, pp. 271–277.

Критерии авторства

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.

13. Kulinich E.M. Modeling the process of return sludge production from aerated concrete production waste. *Problemi informatsiynikh tekhnologiy* [Problems of information technologies]. 2013, no. 3, pp. 62–66.

14. Kulinich E.M. Mathematical model of dosing automated control of the process of preparation of airconcrete ess. *Elektromekhanichni sistemi, metodi optimizatsii ta modelyuvannya* [Electromechanical systems, optimization methods and modeling]. 2015, no. 2, pp. 31–38.

15. Zinovkin V.V., Kulinich E.M., Baisha A.I., Mirnyi V.O. Algorithm of optimum control of multiparameter technological process of preparation an airconcrete. *Avtomatizatsiya, modelyuvannya ta metodi optimizatsii. Elektromekhanichni energozberigayuchi sistemi* [Automation, modeling and optimization methods. Electromechanical energy-efficient systems]. 2012, no. 3, pp. 383–385.

16. Zinovkin V.V., Kulinich E.M. Multiparameter automated control system of aerated concrete production process. *Skhidno-Evropeis'kii zhurnal peredovikh tekhnologiy* [East European Journal of Enterprise Technologies]. 2009, no. 3/3 (39), pp. 38.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.94: 621.01

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-93-111>

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ СКАНИРОВАНИЯ ТВЕРДЫХ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ТЕЛ ПРИ ПОСТРОЕНИИ И АНАЛИЗЕ ИХ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

© А.А. Пыхалов¹, Зыонг Ван Лам², О.П. Белозерцева³

¹Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

^{1,2}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

³Иркутский государственный медицинский университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Красного Восстания, 1.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В современной практике инженерных расчетов прочности материалов деталей их механические характеристики берутся осредненными, полученными на образцах в условиях стандартных испытаний. В реальности же необходимо максимально избежать этого осреднения с целью приведения к минимуму погрешностей при построении математических моделей твердых деформируемых тел на основе метода конечных элементов. **МЕТОДЫ.** В связи с этим в настоящей работе предлагается подход, основанный на сканировании твердых деформируемых тел компьютерным томографом. Однако на пути реализации этого подхода существует серьезная проблема, которая заключается в том, что в результате сканирования деформируемого твердого тела (ДТТ), для его достаточно точной идентификации относительно реального объекта по геометрии и механическим характеристикам материала, необходимо использовать чрезвычайно большой объем данных (информации). **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Для решения этой задачи реализованы математическое моделирование и алгоритм обработки растровых изображений сечений ДТТ для построения изменений механических характеристик его материала и геометрии. Ключевым алгоритмом представленного математического моделирования является использование пиксельной характеристики снимков компьютерного томографа. Необходимой составляющей алгоритма является использование данных натурных испытаний образцов. Учитывая, что компьютерная томография широко используется в медицине, в качестве объектов исследования были взяты фрагменты бедренной кости и челюсти человека. Выбор этих объектов обусловлен индивидуальностью их геометрии и явно выраженной неоднородностью материала. **ВЫВОДЫ.** Получена конечно-элементная модель ДТТ с реальным распределением механических характеристик материала и индивидуальной геометрией, на которой проведен анализ напряженно-деформируемого состояния.

Ключевые слова: математическое моделирование, сканирование, деформируемое твердое тело, растровое изображение, метод конечных элементов, неоднородность механических характеристик материала.

Информация о статье. Дата поступления 19 января 2018 г.; дата принятия к печати 19 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Пыхалов А.А., Зыонг Ван Лам, Белозерцева О.П. Математическое моделирование для компьютерной обработки сканирования твердых деформируемых тел при построении и анализе их конечно-элементных моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 93–111. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-93-111

¹Пыхалов Анатолий Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры теоретической механики и сопротивления материалов ИРНИТУ, директор учебного центра «Компьютерные технологии инженерного анализа» ИРГУПС, e-mail: pikhalov_aa@irgups.ru

Anatoly A. Pykhalov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Theoretical Mechanics and Strengths of Materials INRTU, Director of the Training Center "Computer Technologies of Engineering Analysis" of Irkutsk State Transport University, e-mail: pikhalov_aa@irgups.ru

²Зыонг Ван Лам, аспирант, e-mail: bright1388@mail.ru,
Duong Van Lam, Postgraduate student, e-mail: bright1388@mail.ru

³Белозерцева Ольга Петровна, кандидат медицинских наук, ассистент кафедры стоматологии, e-mail: stom.ocean@mail.ru
Olga P. Belozertseva, Candidate of Medicine, Assistant Professor of the Dentistry Department, e-mail: stom.ocean@mail.ru



MATHEMATICAL MODELING FOR COMPUTER PROCESSING OF SCANS OF DEFORMABLE SOLIDS UNDER CONSTRUCTION AND ANALYSIS OF THEIR FINITE ELEMENT MODELS

A.A. Pykhalov, Duong Van Lam, O.P. Belozertseva

¹Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

²Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

³Irkutsk State Medical University,
1, Krasnogo Vosstaniya St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The modern practice of engineering calculations of part material strength uses averaged mechanical characteristics obtained through the standard tests of samples. In real conditions, it is strongly advised to avoid this averaging in order to minimize the errors when constructing the mathematical models of deformable solids using a finite element method. **METHODS.** In this paper, we propose a new approach based on the scanning of deformable solids using computed tomography. However, a series problem hinders the implementation of this approach: accurate identification of the scanned deformable solid relative to a real object by geometry and mechanical properties of material require an extremely large amount of data (information). **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** This problem is solved through the use of mathematical modeling and an algorithm for processing bitmap images of deformable solid sections enabling to construct the variations of mechanical characteristics of its material and geometry. The key algorithm of the presented mathematical modeling is the use of pixel characteristics of computed tomography images. Also, the necessary component of the algorithm is the use of data obtained via full-scale testing of samples. Assuming the wide use of computed tomography for medical purposes the fragments of human femur and jaw have been chosen as the objects of the study. This choice is determined by the specificity of their geometry and explicit heterogeneity of the bone material. **CONCLUSION.** A finite element model of a deformable solid with a real distribution of mechanical characteristics of material and individual geometry has been developed. The stress-strain state has been analyzed on the basis of the model. **Keywords:** *mathematical modeling, scanning, deformable solid, bitmap image, finite element method, inhomogeneity of material mechanical characteristics*

Information about the article. Received January 19, 2018; accepted for publication February 19, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Pykhalov A.A., Duong Van Lam, Belozertseva O.P. Mathematical modeling for computer processing of scans of deformable solids under construction and analysis of their finite element models. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 93–111. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-93-111

Введение

Развитие современной расчетно-инженерной базы при проектировании изделий и объектов наиболее эффективно реализуется с применением математического моделирования и алгоритмизации на основе метода конечных элементов (МКЭ), например, при решении задач анализа их напряженно-деформированного состояния (НДС) [1] и других. Однако при использовании этого метода остаются вопросы, касающиеся точности задания механических характеристик материала и параметров геометрии изделия. Проблема заключается в том, что в существующей практике инженерных расчетов механические характеристики материала деталей задаются осредненными, полученными на образцах в условиях стандартных испытаний, тогда как даже в одной детали изделия эти характеристики могут существенно различаться. Данные обстоятельства оказывают влияние на точность расчетов (величину погрешности), в особенности для деформируемых твердых тел (ДТТ) с высокой степенью неоднородности материала. Также геометрия детали в ее конечно-элементной (КЭ) модели строится практически повсеместно относительно чертежей или электронных макетов, что также отличается от реального изделия.

Для решения представленных проблем предлагается использовать сканирование ДТТ [2]. Однако на пути реализации названного подхода существует еще одна серьезная проблема, которая заключается в том, что в результате сканирования ДТТ, для достаточно точной



его идентификации относительно реального объекта по геометрии и механическим характеристикам материала, требуется использовать чрезвычайно большой объем данных (информации). Этот объем определяется формированием следующих наборов данных: матрицы индексов цвета от растровых изображений сканирования сечений ДТТ и их выборки, данные по КЭ модели объекта, а также данные, получаемые от совместной обработки матрицы индексов цвета и КЭ модели. То есть, обработка этих данных возможна только на основе специального математического моделирования и его компьютерной реализации (алгоритмизации), с разработкой и применением комплекса методик и математических методов, представленных в настоящей работе.

Материалы и методы исследования

Отметим, что на сегодняшний день сканирование компьютерным томографом (КТ) как инновационная технология достигло высокого уровня развития и получило широкое применение в технике и медицине. В качестве объекта исследования была использована костная ткань человека (взят фрагмент бедренной кости и зуб). Выбор данного материала обусловлен тем, что он имеет индивидуальную геометрию и высокую степень неоднородности. Кроме того, практика исследования механических свойств костной ткани насчитывает большое количество натурных испытаний (экспериментальных опытов) [3–7], результаты которых необходимы для разработки, представленной в настоящей статье. Технология получения картины распределения механических характеристик в костной ткани с применением КТ представлена в работах [2, 8, 9], оценка точности и сходимости результатов применения этой технологии в математическом моделировании ДТТ с применением численного решения МКЭ – в работах [9, 10].

Для решения задачи теории упругости используется метод, разработанный на основе МКЭ и заключающийся в минимизации интегральной величины, связанной с работой напряжений и внешней приложенной нагрузки [11]. Если задача решается в перемещениях и на границе заданы их значения, то нужно минимизировать потенциальную энергию деформируемого тела. Тогда общепринятая формулировка МКЭ предполагает использование метода перемещений теории упругости, связанного с отысканием узловых значений вектора перемещений. После определения вектора перемещений вычисляются компоненты тензоров деформаций и напряжений. Полная потенциальная энергия упругой системы имеет следующий вид:

$$\Pi = \Lambda + Wp, \quad (1)$$

где Λ – энергия деформаций; Wp – потенциальная энергия приложенных сил.

Работа воздействующих внешних нагрузок W равна по величине и противоположна по знаку их потенциальной энергии – Wp :

$$Wp = -W. \quad (2)$$

Таким образом, получаем

$$\Pi = \Lambda - W. \quad (3)$$

Функционал потенциальной энергии, представленный в соотношении (3), для дискретной области определения деформируемой системы запишется в виде



$$\Pi = \sum_{e=1}^E (\Lambda^{(e)} - W^{(e)}) = \sum_{e=1}^E \Pi^{(e)}, \quad (4)$$

где E – число конечных элементов, на которое разбита область определения; $\Pi^{(e)}$ – доля потенциальной энергии отдельного конечного элемента; $\Lambda^{(e)}$ – внутренняя энергия деформации отдельного элемента; $W^{(e)}$ – работа внешних сил на отдельном конечном элементе.

Внутренняя энергия упругой деформации (сопротивления) определяется как

$$\Lambda^{(e)} = \frac{1}{2} \int_{V^{(e)}} \{\delta\}^{(e)T} [B]^T [D] [B] \{\delta\}^{(e)} dV, \quad (5)$$

где $\{\delta\}^{(e)}$ – вектор узловых перемещений конечного элемента [12]; $[B]$ – матрица дифференцирования вектора $\{\delta\}^{(e)}$; $[D]$ – матрица упругости моделируемого материала.

Работа, совершаемая внешними силами, записанными через эквивалентные узловые значения, определяется выражением вида

$$W^{(e)} = \{\delta\}^{(e)T} \{F\}^{(e)}, \quad (6)$$

где $\{F\}^{(e)}$ – вектор внешней сосредоточенной и эквивалентной узловой нагрузки отдельного конечного элемента [12].

Подстановкой выражений (5) и (6) в равенство для полной потенциальной энергии механической деформируемой системы (4) получим

$$\Pi = \sum_{e=1}^E \left(\frac{1}{2} \int_{V^{(e)}} \{\delta\}^{(e)T} [B]^T [D] [B] \{\delta\}^{(e)} dV - \{\delta\}^{(e)T} \{F\}^{(e)} \right). \quad (7)$$

Реализуя принцип стационарности величины потенциальной энергии Π деформируемой системы по перемещению $\{\delta\}$, имеем:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{\delta\}} = \sum_{e=1}^E \left(\int_{V^{(e)}} [B]^T [D] [B] dV \{\delta\}^{(e)} - \{F\}^{(e)} \right) = 0. \quad (8)$$

Представленный принцип использован в работе при решении задач на основе метода конечных элементов в анализе напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемых объектов.

Структура математического моделирования общей технологии, предлагаемой к применению, включает полный комплекс этапов – от сканирования ДТТ до получения его КЭ модели и проведения анализа НДС КЭ модели (рис. 1).

Реализация алгоритма выполняется последовательно в соответствии с представленными блоками (см. рис. 1).

Блок 1. Процесс исходной интерпретации изучаемого твердого деформируемого тела с неоднородными механическими характеристиками. Здесь проводится предварительная оценка неоднородности структуры и геометрии изучаемого ДТТ по параметрам:

- степень неоднородности структуры и механических характеристик;
- регулярность геометрии (сложность поверхностей);
- наличие контактирующих объектов;



- обзор (наличие/отсутствие) данных натурных испытаний о механических характеристиках материала объекта исследования;
- условия эксплуатации объекта исследования.

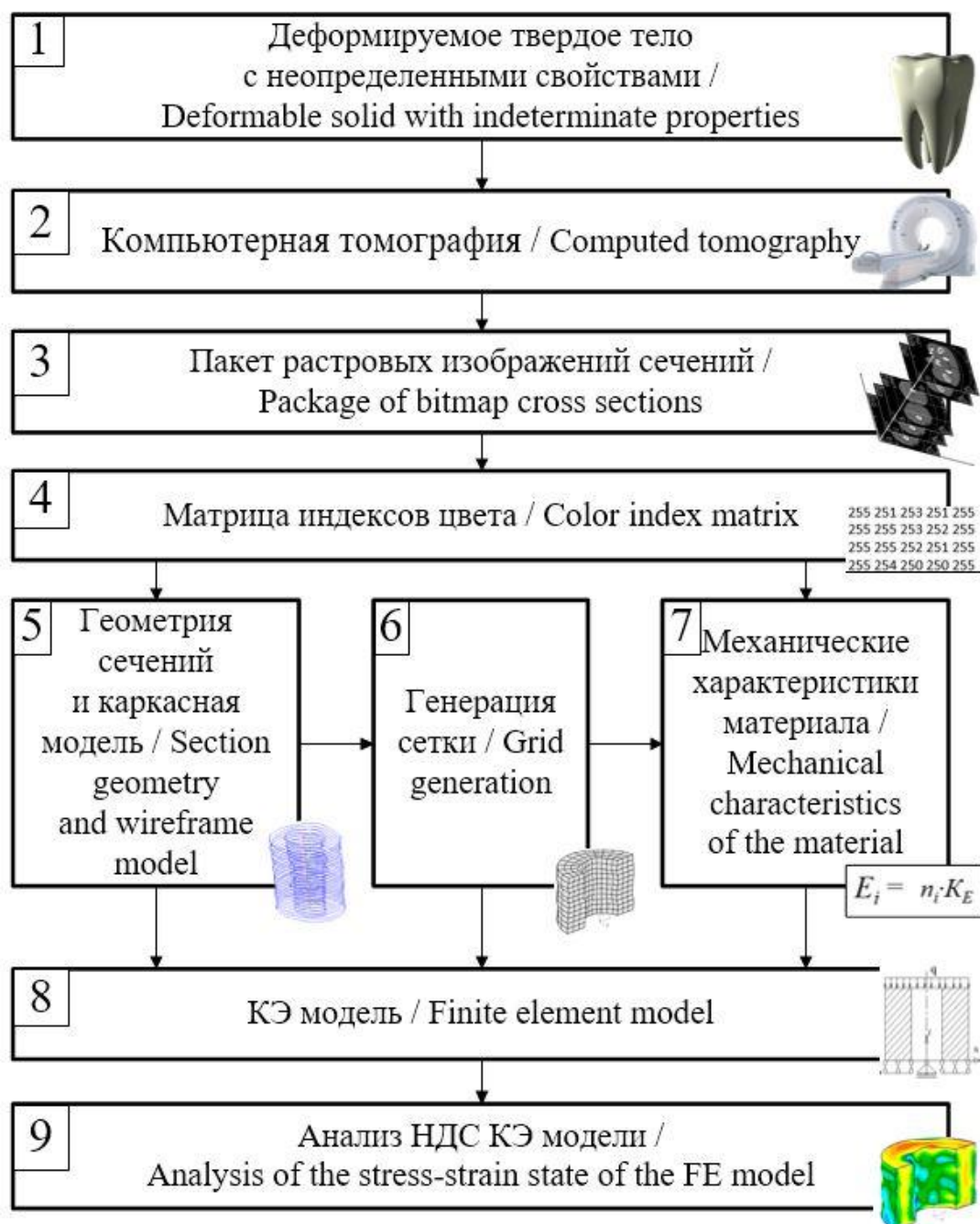


Рис. 1. Структура математического моделирования технологии сканирования ДТТ с неоднородными механическими свойствами материала

и геометрией для построения их КЭ модели и проведения анализа НДС

Fig. 1. Mathematical modeling structure of the scanning technology of a deformable solid body with heterogeneous mechanical properties of material and geometry for constructing their finite element (FE) model and stress-strain state analysis

Блок 2. Формирование настроек КТ и процесс сканирования ДТТ в зависимости от интерпретации предварительного исследования изучаемого объекта:

- тип КТ (медицинский, промышленный, специальный и др.);



- настройки КТ, из которых только несколько являются необходимыми для построения КЭ модели⁴ [13]: основное и дополнительные направления сканирования, размер изображений, шаг сканирования, тип формата полученных изображений (DICOM [14], JPEG, и др.);
- проведение КТ-сканирования^{4,5} [13].

Блок 3. Формирование пакета растровых (цифровых) изображений, которое представляет собой документирование результатов КТ-сканирования ДТТ с целью его последующей компьютерной визуализации. Результат записывается в виде файла, в котором представлена последовательность растровых изображений сечений ДТТ, полученных на каждом шаге сканирования.

Блок 4. Построение матрицы индексов цвета. В данном блоке осуществляется представление растровых изображений сечений (набора пикселей) в памяти ЭВМ в виде двумерной матрицы [8]. Каждый элемент этой матрицы имеет свое значение индекса цвета. Матрица индексов цвета имеет следующий вид:

$$I(m, n) = \begin{bmatrix} I_{1,1} & \cdots & I_{i,1} & \cdots & I_{m,1} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{1,j} & \cdots & I_{i,j} & \cdots & I_{m,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{1,n} & \cdots & I_{i,n} & \cdots & I_{m,n} \end{bmatrix} \quad i \in [1, m]; j \in [1, n]. \quad (9)$$

Блок 5. Построение геометрии сечения и каркасной модели ДТТ осуществляется с применением специально разработанной программы обработки растровых изображений сканирования КТ [15] в сечениях ДТТ [16–18]. Блок-схема работы блока 5 представлена на рис. 2 [8; 9].

Работа алгоритма этого блока включает следующие этапы:

1. На входе используется пакет растровых (цифровых) изображений в сечениях ДТТ, представленных в виде двумерной матрицы (блок 4 рис. 1).
2. Построение предварительной геометрии сечения и определение ее временного центра тяжести. Этот процесс выполняется с помощью математических функций «0-1» или «0-1-2» в зависимости от сложности структуры материала.

Математическая функция «0-1» осуществляет временное (предварительное) присвоение пикселям матрицы индексов цвета следующих значений: для определения области объекта – значений, равных 1, для остальных пикселей – значений, равных 0:

$$f_{01}(n_{\text{ВП}}, n_{\text{НП}}, I_{\text{grey}}) = \begin{cases} 0, I_{\text{grey}} > n_{\text{ВП}} \text{ или } I_{\text{grey}} < n_{\text{НП}} \\ 1, n_{\text{ВП}} \leq I_{\text{grey}} \leq n_{\text{НП}} \end{cases}, \quad (10)$$

где $n_{\text{ВП}}$ и $n_{\text{НП}}$ – верхний и нижний фиксированные пределы определения области объекта исследования, $n_{\text{ВП}}, n_{\text{НП}} \in [0, 255]$.

Преимущество использования математической функции «0-1» состоит в быстроте

⁴Марусина М.Я., Казначеева А.О. Современные виды томографии: учеб. пособие. СПб: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2006. 132 с. / Marusina M.Ya., Kaznacheeva A.O. Modern tomography types: Learning aids. St. Petersburg: SPbGU ITMO Publ., 2006, 132 p.

⁵Лучевая диагностика: учебник / под ред. Г.Е. Труфанова. М.: ГЭОТАР-Медиа, 2015. 496 с. / Radiodiagnosis: Textbook / under edition of G.E. Trufanov. Moscow: GEOTAR-Media Publ., 2015, 496 p.



предварительного определения контура сечения объекта. При необходимости для областей с повышенным уровнем сложности геометрии используется математическая функция «0-1-2»:

$$f_{012}(n_{НП}, n_C, n_{ВП}, I_{grey}) = \begin{cases} 0, I_{grey} < n_{НП} \\ 1, n_{НП} \leq I_{grey} < n_C \\ 2, n_C < I_{grey} \leq n_{ВП} \end{cases}, \quad (11)$$

где $n_{ВП}$ и $n_{НП}$ – верхний и нижний фиксированные пределы определения области объекта исследования; n_C – предел определения силовой части объекта исследования, $n_{ВП}, n_C, n_{НП} \in [0, 255]$.

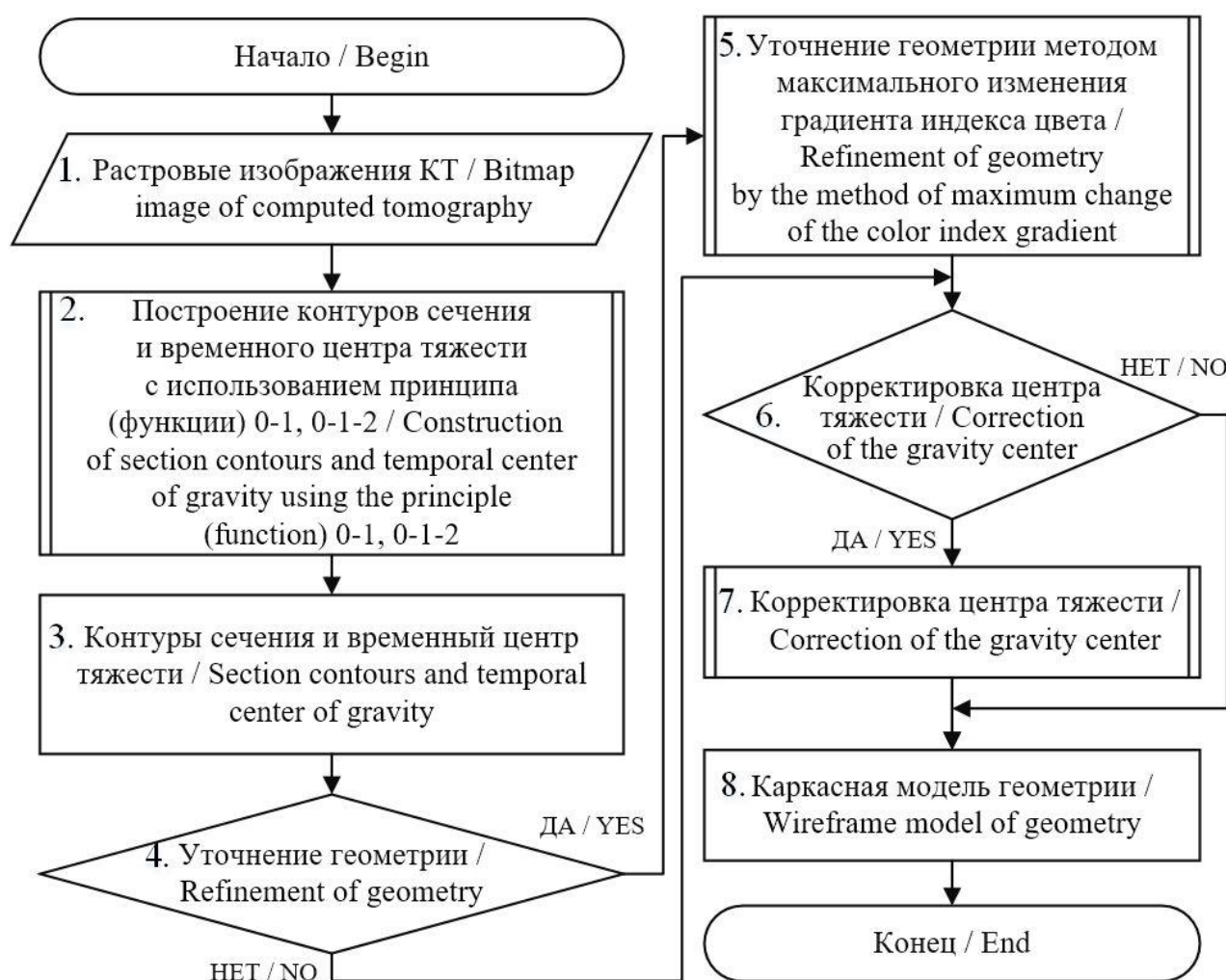


Рис. 2. Блок-схема алгоритма построения геометрии сечения ДТТ
Fig. 2. Block-diagram of the algorithm for deformable solid section geometry construction

На рис. 3 представлен результат обработки растрового изображения сканирования с использованием математической функции «0-1» и «0-1-2».

3, 4. Получение контура предварительной геометрии сечения с временным центром тяжести. Условный блок 4 (см. рис. 2) определяет необходимость уточнения геометрии.

5. Процесс уточнения геометрии проводится на основе исследования изменения гра-

диента индекса цвета (рис. 4) [19, 20], из которого можно определить точное месторасположение точки геометрии контура сечения. Математическая модель решения и алгоритм его компьютерной реализации представлены в работе [8].

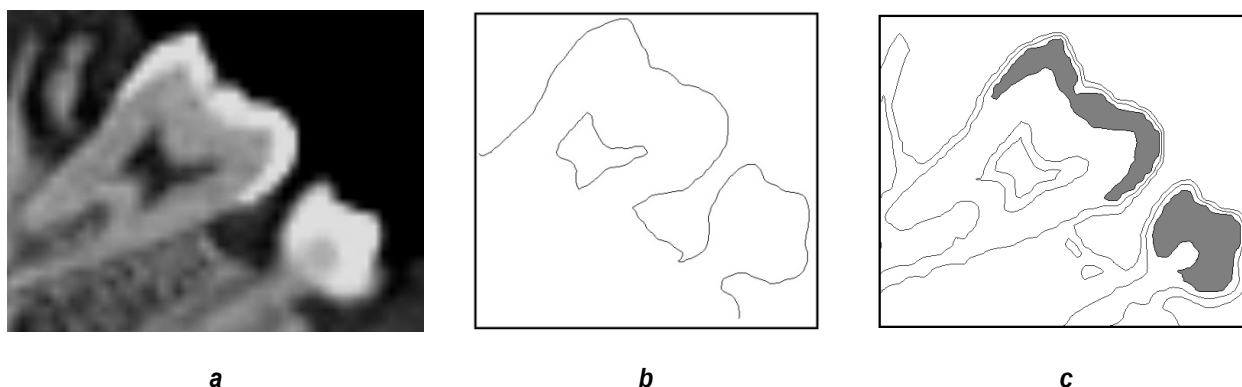


Рис. 3. Результат обработки растрового изображения сканирования реального тела:

а – растровое изображение; б – использование функции «0-1»;

с – использование функции «0-1-2» с представлением силовой части

Fig. 3. The result of bitmap image processing of real body scanning: а – bitmap image; б – use of the function «0-1»; с – use of the function «0-1-2» with the representation of the strength part

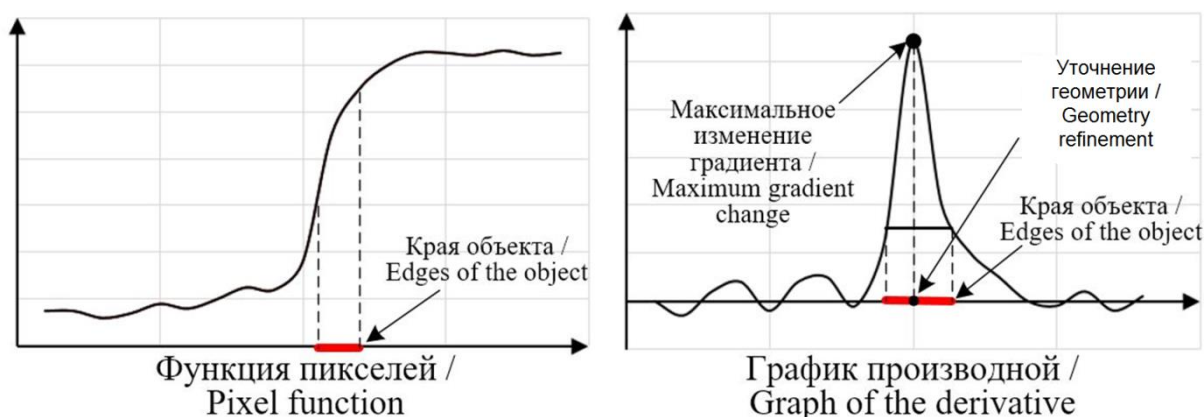


Рис. 4. Исследование изменения градиента индексов цвета для построения геометрии сечения
Fig. 4. Study of color indice gradient variations for constructing the section geometry

6. Для полученных уточненных контуров геометрии сечений уточняют и их центры тяжести. При необходимости они могут быть помещены на одну выбранную прямолинейную (не прямолинейную) ось. То есть, для некоторых типов задач требуется корректировка центра тяжести. При выборе варианта «да» в пункте «корректировка центра тяжести» – перейти к корректировке. При варианте «нет» этот этап пропускается.

7. Корректировка центра тяжести всех сечений относительно уточненной геометрии сечения.

8. Результаты обработки всех сечений объединяются для создания каркасной модели. Расстояние между сечениями равно шагу сканирования КТ (рис. 5).

Блок 6. Построение сетки КЭ модели ДТТ.

В зависимости от регулярности геометрии ДТТ используются два метода генерации сетки КЭ модели [9]:

1) если геометрия регулярна, то переход от каркасной модели геометрии к генерации КЭ сетки осуществляется с использованием КЭ типа гексаэдр (HEX) (рис. 6);

2) в случае нерегулярной геометрии переход от каркасной модели осуществляется с построением объемной твердотельной геометрической модели. Чаще всего используется КЭ типа тетраэдр (ТЕТ) (рис. 7), а если геометрия позволяет, то предпочтение отдается КЭ типа HEX. Генерация сетки КЭ модели проводится в программном комплексе MSC Patran.

Блок 7. Для определения механических характеристик материала узлов и элементов КЭ модели используются основные подходы, предложенные в работах [2, 8], с помощью специальной программы [15]. Последовательно выполняются следующие действия:

- вычисляется весовой коэффициент для определения модуля упругости отдельных пикселей;
- совмещаются узлы сетки КЭ модели с координатами пикселей;
- определяются механические характеристики материала узлов и элементов КЭ модели;
- осуществляется преобразование структуры данных в виде файла *.pcf для возможности использования в КЭ модели.

Алгоритм работы этого блока представлен на рис. 8.

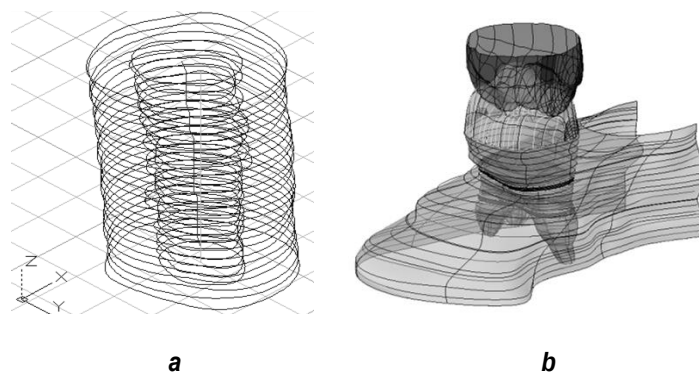


Рис. 5. Каркасная модель геометрии сечений кости (а) и зуба (б) человека
Fig. 5. Wireframe model of the section geometry of a bone (a) and a human tooth (b)

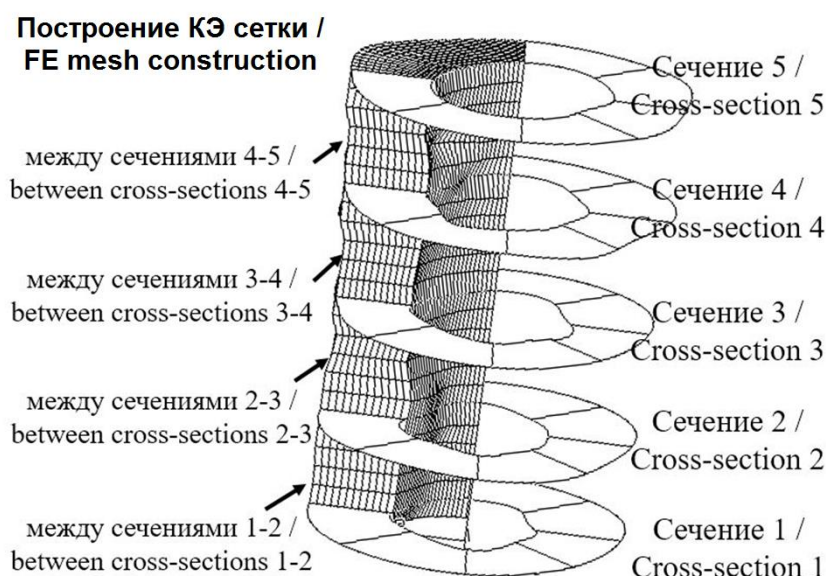


Рис. 6. Интерполирование КЭ сетки между сечениями с использованием КЭ гексаэдр
Fig. 6. Interpolation of the FE mesh between the cross-sections using a finite element hexahedron

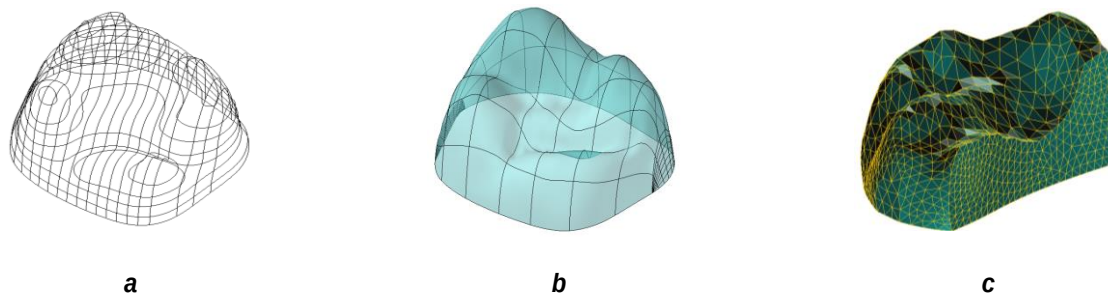


Рис. 7. Построение сетки КЭ модели ДТТ нерегулярной геометрии:
а – каркасная модель; б – объемная твердая геометрическая модель;
с – генерация сетки с использованием КЭ типа тетраэдр
Fig. 7. Construction of a FE model mesh of the deformable
solid with irregular geometry: a – wireframe model; b – solid geometric model;
c – mesh generation using finite elements of the tetrahedron type

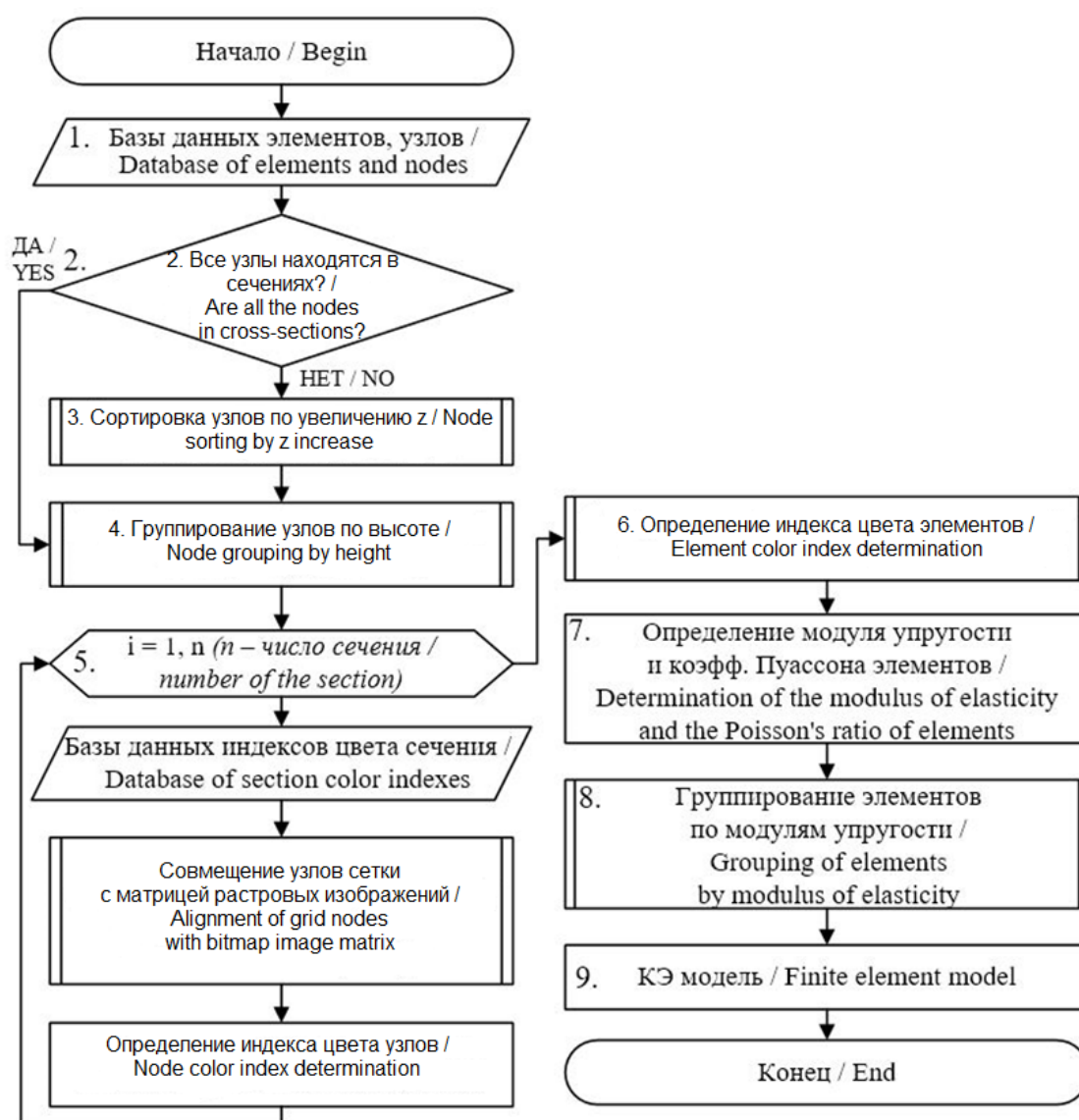


Рис. 8. Блок-схема определения механических характеристик материала
узлов и элементов КЭ модели
Fig. 8. Block-diagram for determining mechanical properties of the material of nodes and elements
of the finite element model



Основными этапами алгоритма являются:

1. Определение координат узлов конечных элементов, которые записываются в матрице $Nodes(n,5)$. Топология КЭ записывается в матрице $Elms(m,10)$ для элементов типа HEX или в матрице $Elms(m,6)$ – для элементов типа ТЕТ.

2. Проверка координат узлов на предмет их нахождения в сечениях пакета растровых изображений или в пространстве между сечениями. Ответ «нет» – перейти к этапу 3 и 4, ответ «да» – перейти к этапу 5.

3, 4. Сортировка узлов по увеличению координаты z с помощью алгоритма QuickSort [21] и решение задачи об упаковке узлов с одинаковым пространством между сечениями. При извлечении координат узлов из КЭ модели по умолчанию они будут отсортированы по порядковому номеру узлов, а не по увеличению координат z , в то время как растровые изображения сечений расположены в порядке возрастания координаты z . Поэтому сортировка значительно сокращает объем данных и время их обработки.

5. Присвоение номера индекса цвета пикселя каждому узлу КЭ сетки сечения. Цикл ввода данных индексов цвета осуществляется последовательными переходами от первого сечения до последнего. Результат определения индексов цвета узлов заполняется в матрицу $Nodes(n,5)$.

Различаются два случая. Первый из них, самый простой, имеет место, когда узлы КЭ полностью лежат в соседних плоскостях с растровым изображением, и размер конечных элементов равен дистанции между ними (рис. 9). Присвоение узлам КЭ сетки значений индексов цвета от пикселей здесь осуществляется прямым совпадением узла КЭ сетки с пикселем по совпадающим координатам.

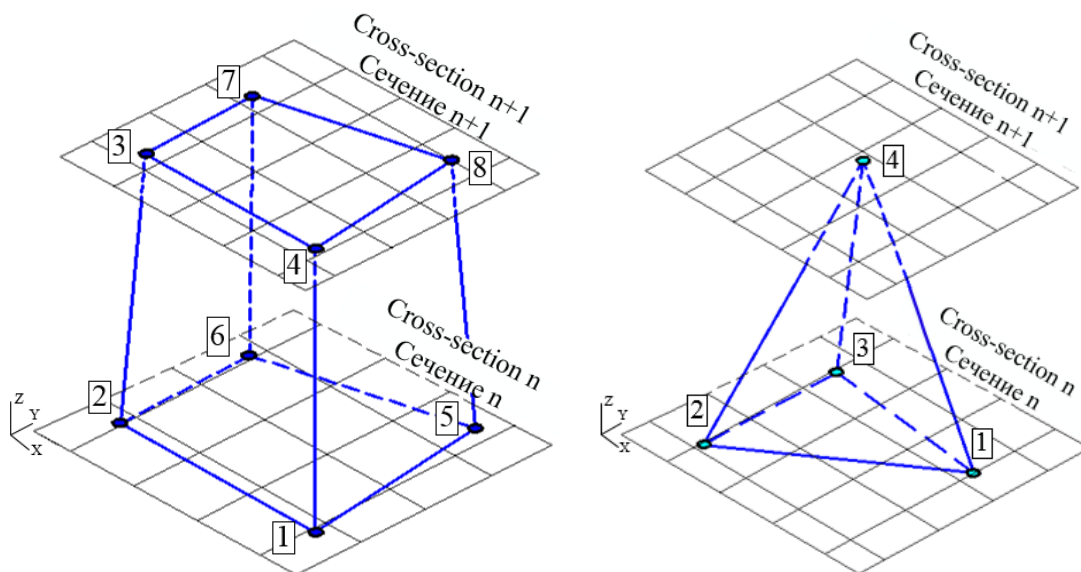


Рис. 9. Узлы КЭ модели, находящиеся в сечениях
Fig. 9. FE model nodes locating in the cross-sections

Второй случай сложнее и является общим для решения представленной проблемы. Он связан с тем, что узлы КЭ сетки по их координатам лежат между соседними плоскостями с растровым изображением, но не совпадают с ними (рис. 10). В этом случае используется интерполяция индекса цвета конечного узла по прямой, параллельной оси Z , и по прямой, наклонной к оси Z , в зависимости от сложности геометрии ДТТ. Более подробное описание представлено в работе [9].

Интерполяция индекса цвета n_p в точке P определяется по формуле



$$n_P = k_1 n_{P_1} + k_2 n_{P_2}, \quad (12)$$

где $k_1 = \frac{h_1}{h_1 + h_2} = \frac{h_1}{s}$; $k_2 = \frac{h_2}{h_1 + h_2} = \frac{h_2}{s} = 1 - k_1$.

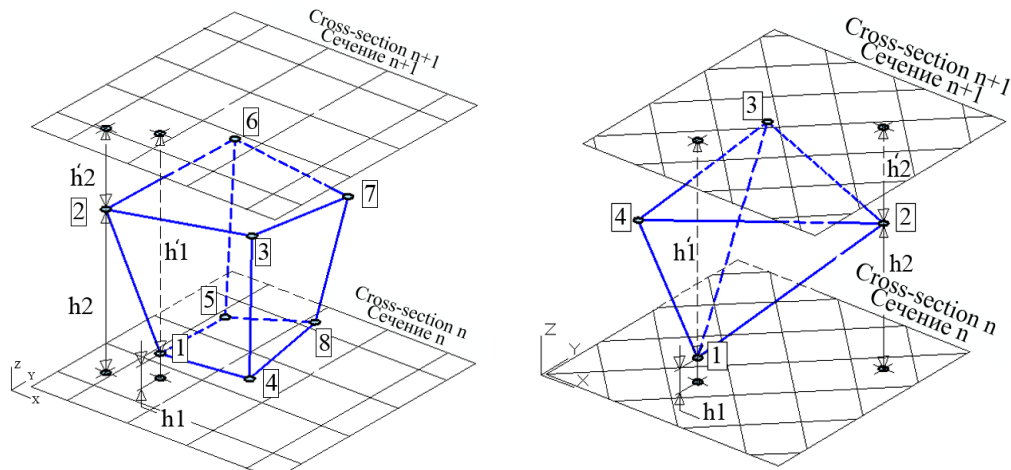


Рис. 10. Узлы КЭ модели, находящиеся в пространстве между сечениями
Fig. 10. FE model nodes locating in the space between the cross-sections

В большинстве случаев значение индекса цвета пикселя присваивается узлу, на котором расположена его проекция с достаточной точностью. Однако в случае, когда проекция узла лежит не в центре пикселя, то есть вероятность присвоения узлу его номера невысока, предлагается использовать еще два дополнительных метода для определения индекса цвета в узлах КЭ сетки: усредненное значение и математическое ожидание индексов цвета узла.

На рис. 11 представлен принцип определения усредненного значения индексов цвета в узле КЭ сетки.

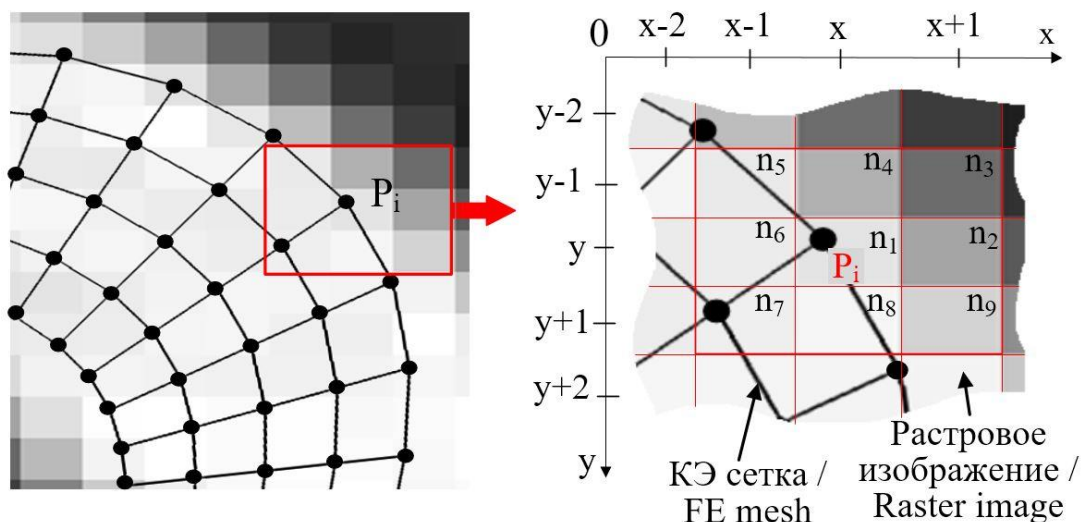


Рис. 11. Усредненное значение индексов цвета узла
Fig. 11. Averaged value of node color indices

Усредненное значение индексов цвета, присваиваемых узлу КЭ сетки, определяется выражением



$$n_{P_i} = \frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 n_j, \quad (13)$$

где $P_i(x, y)$ – номер (координаты) узла КЭ сетки в растровом изображении сечения; n_j – значения индексов цвета пикселя узла P_i и соседних пикселей, соответствующих координатам: $n_1(x, y)$; $n_2(x+1, y)$; $n_3(x+1, y-1)$; $n_4(x, y-1)$; $n_5(x-1, y-1)$; $n_6(x-1, y)$; $n_7(x-1, y+1)$; $n_8(x, y+1)$; $n_9(x+1, y+1)$.

Более точное значение индекса цвета, присеваемое узлу КЭ сетки, определяется на основе использования выражения для определения математического ожидания (рис. 12).

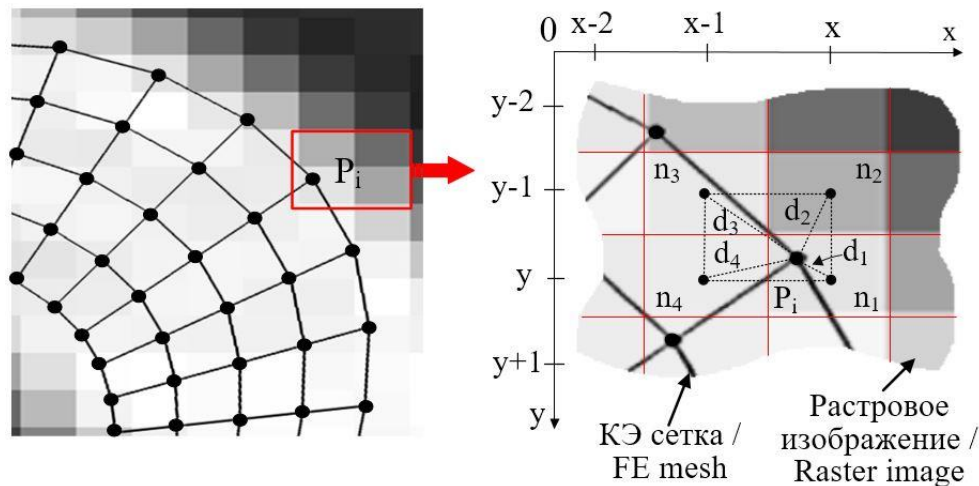


Рис. 12. Математическое ожидание индексов цвета узла
Fig. 12. Mathematical expectation of node color indices

Для рассматриваемой задачи математическое ожидание индексов цвета конечного узла определяется выражением

$$n_{P_i} = \sum_{j=1}^4 n_j \frac{d_j}{d}, \quad (14)$$

где $P_i(x, y)$ – номер (координаты) узла КЭ сетки в растровом изображении сечения; n_j – значения индексов цвета ближайших к узлу P_i пикселей; d – сумма расстояний между координатами узла P_i и координатами центров ближайших к узлу P_i пикселей, которая определяется следующим выражением:

$$d = d_1 + d_2 + d_3 + d_4. \quad (15)$$

6. Определение индексов цвета каждого конечного элемента как среднее арифметическое значение индексов цвета его узлов.

7. Преобразование значения индекса цвета конечных элементов в значения их модулей упругости через умножение на весовой коэффициент:

$$E_i = k_E \frac{\sum_{j=1}^q n_j}{q}, \quad (16)$$

где q – число узлов в элементе ($q = 4, 8, \dots$); n_j – индекс цвета j -го конечного узла; E_i – модуль

упругости i -го конечного элемента; k_E – весовой коэффициент модуля упругости.

Весовой коэффициент определяется как отношение модуля упругости, полученного натурным испытанием, и среднего значения индексов цвета [2, 8].

8. Упаковка элементов с одинаковыми значениями модуля упругости.

9. Результат записывается в виде файла структуры *.pcr [15].

Блок 8. Получение КЭ модели ДТТ с неоднородностью механических характеристик материала и геометрией по результатам выполнения блоков 5–7 (см. рис. 1). Это означает, что КЭ модель ДТТ построена с индивидуальной (реальной) геометрией и каждый ее конечный элемент имеет свое значение модуля упругости. То есть структура механических характеристик кости определяется совокупностью этих конечных элементов.

Блок 9. Для проведения анализа НДС КЭ модели ДТТ в КЭ модели дополнительно задаются граничные условия и внешняя нагрузка. Анализ НДС проводится в программном комплексе MSC Nastran. Результатом анализа является полный комплекс напряжений и деформаций исследуемого ДТТ. Доказательство точности и сходимости представленного численного решения приведено в работах [9, 10].

На рис. 13 представлены результаты построения КЭ модели фрагмента бедренной кости человека, которая имеет регулярную геометрию. Однако материал кости имеет сложную анизотропную структуру механических характеристик (рис. 13, а) [22]. Эта неоднородность показана в растровом изображении результатов сканирования (рис. 13, б), где представлено изменение модуля упругости по его пикселям и по объему КЭ модели (рис. 13, в).

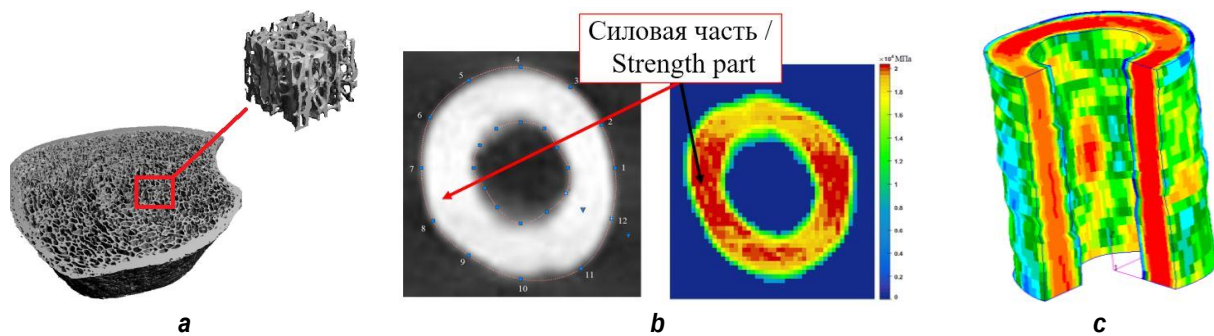


Рис. 13. Неоднородность структуры бедренной кости
Fig. 13. Heterogeneity of femoral bone structure

Для проведения анализа НДС КЭ модели в ней формируются граничные условия и действующая на деформируемое тело внешняя нагрузка (рис. 14, а). На рис. 14, б представлены результаты анализа НДС ДТТ в виде поля эквивалентных напряжений, полученных с учетом неравномерности распределения механических характеристик по объему. В этом случае по толщине стенки кости отчетливо определяются напряжения силовой и не силовой ее части.

На рис. 15 представлено построение КЭ модели зуба человека. В отличие от бедренной кости зуб имеет более высокую степень неоднородности механических характеристик материала и нерегулярности геометрии. Он состоит из эмали, дентина и других областей (рис. 15 а, б), каждая из которых имеет свой порядок и величину изменения модуля упругости. Поэтому для определения среднего значения индексов цвета (блок 7, пункт 7) используется формула математического ожидания [8]:

$$M_n = \sum_i n_i \cdot p_i(n_i). \quad (17)$$

На рис. 15, с представлено распределение величины модуля упругости по элементам

КЭ модели. Это распределение полностью соответствует общим представлениям о структуре свойств материала зуба. Однако для каждого отдельного зуба человека имеются свои индивидуальные особенности.

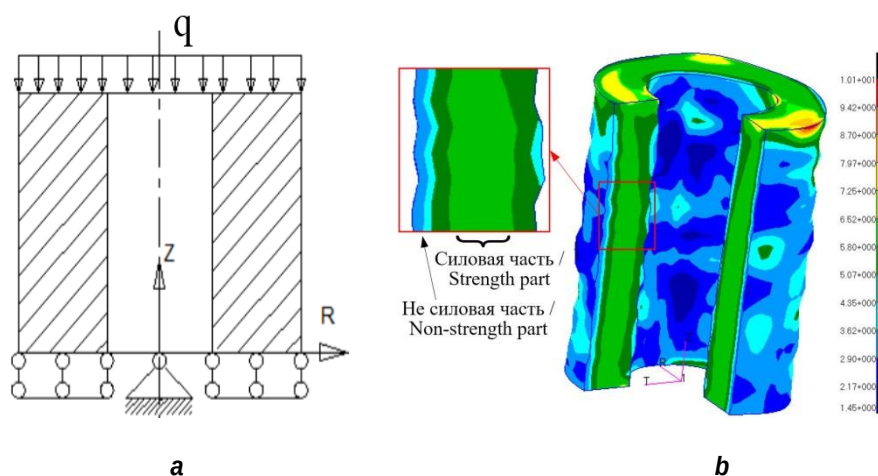


Рис. 14. Построение КЭ модели кости: а – граничное условие и нагрузка; б – результат анализа НДС – напряжение VonMises
Fig. 14. Construction of the FE model of a bone: a – boundary condition and load; б – result of the stress-strain state analysis – VonMises stress

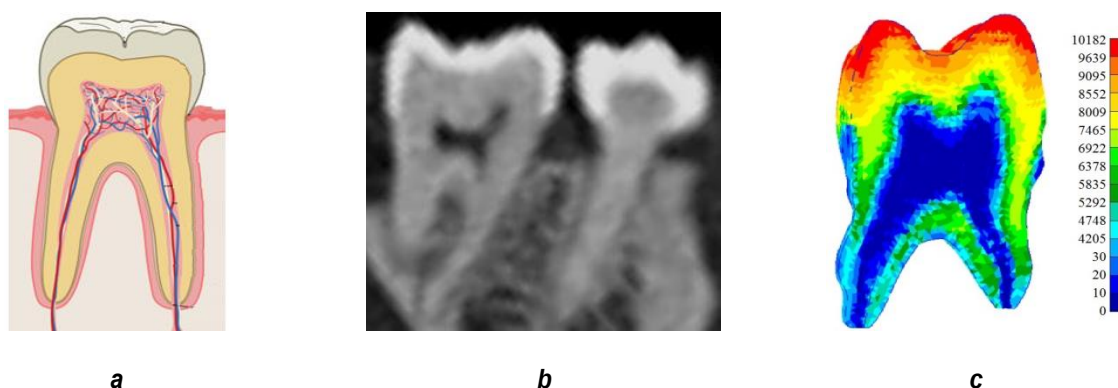


Рис. 15. Построение КЭ модели зуба человека: а – структура зуба; б – растровое изображение сканирования; с – трехмерная КЭ модель с распределением механических характеристик материала
Fig. 15. Construction of the FE model of a human tooth: a – tooth structure; б – scanned bitmap image; с – three-dimensional FE model with the distribution of mechanical characteristics of material

На рис. 16 представлена расчетная схема КЭ модели зуба человека с граничными условиями и внешней нагрузкой, где кроме этих параметров дополнительно представлены условия для решения задачи контактного взаимодействия зубов без «продукта» (рис. 16, а) и с «продуктом» (рис. 16, б).

Результат построения КЭ модели зуба с механическими характеристиками и геометрией, максимально отвечающих их реальным прототипам, представлен на рис. 17.

Результаты анализа НДС зуба (рис. 18) показывают, что при их взаимодействии без «продукта» (рис. 18, а) максимумы напряжений наблюдаются в точках контакта на вершинах зубных бугров. При сжатии «продукта» между зубами максимумы напряжений смещаются в сторону впадин верхней части зуба (рис. 18, б).

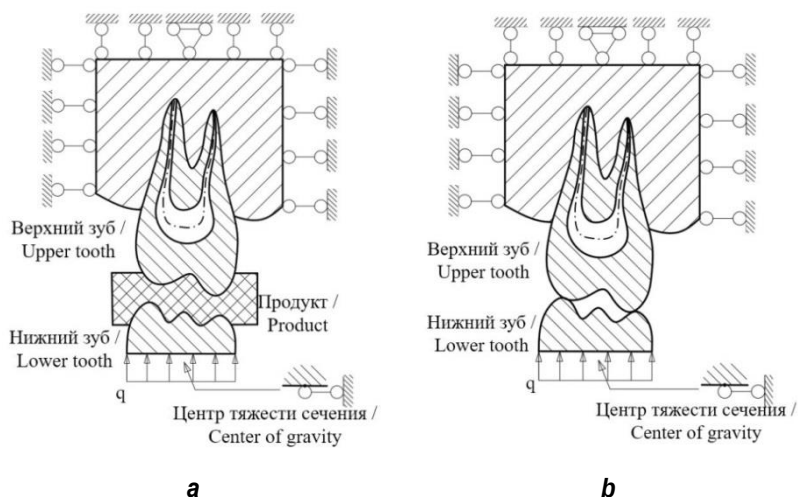


Рис. 16. Схема контактного взаимодействия КЭ модели зуба:
а – без «продукта»; б – с «продуктом»
Fig. 16. Scheme of contact interaction of the tooth FE model:
a – without a “product”; b – with a “product”

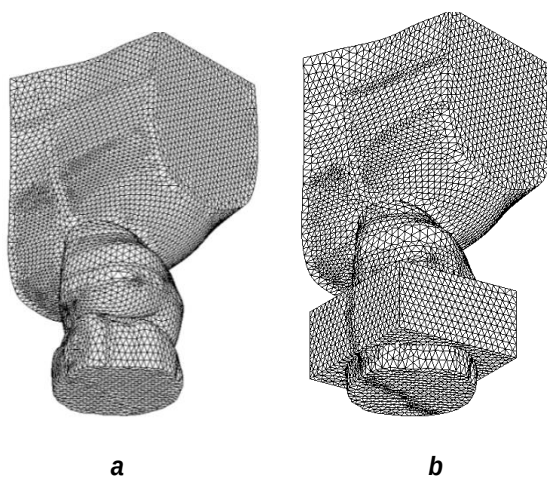


Рис. 17. Конечно-элементная модель зуба: а – без «продукта»; б – с «продуктом»
Fig. 17. Finite element model of a tooth: a – without a “product”; b – with a “product”

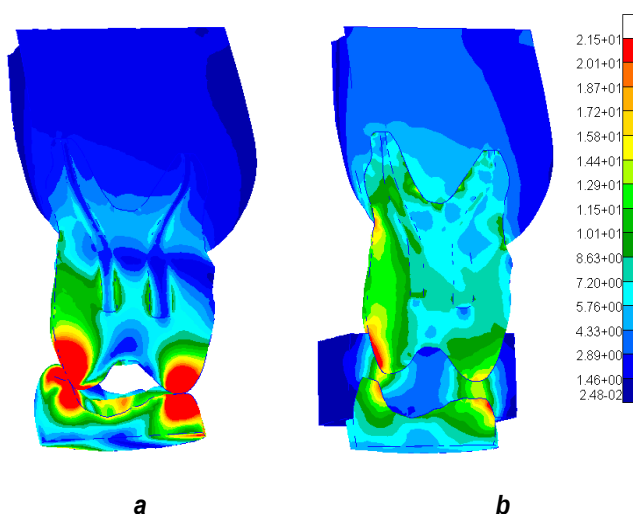


Рис. 18. Результат анализа НДС – напряжение VonMises КЭ модели зуба:
а – без «продукта»; б – с «продуктом»
Fig. 18. Result of the stress-strain state analysis – VonMises stress of tooth FE models:
a – without a “product”; b – with a “product”



Заключение

Таким образом, результаты проведенных исследований показывают, что представленный комплекс технологий, построенный на основе КТ-сканирования ДТТ и данных натурных испытаний стандартных образцов, позволяет реализовать возможность построения и анализа его КЭ моделей с реальным распределением неоднородности механических характеристик материалов и геометрии. Развитие этого комплекса продолжается в направлении использования других физических методов (магнитный, ультразвуковой и др.) при сканировании и автоматизированной компьютерной обработке растровых изображений сечений реальных изделий и объектов.

Библиографический список

1. Пыхалов А.А., Милов А.Е. Контактная задача статического и динамического анализа сборных роторов турбомашин: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 192 с.
2. Пат. № 2542918, Российская Федерация, МПК G06T 1/00 A61B 6/00. Способ определения значений модуля упругости и его распределения в конструктивных элементах, обладающих неопределёнными свойствами прочности / А.А. Пыхалов, В.П. Пашков, И.Н. Зотов, М.С. Кувин; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»; заявл. 30.10.2013; опубл. 27.02.2015. Бюл. № 6.
3. Утенькин А.А., Свешникова А.А. Биомеханические свойства компактного вещества кости // Архив анатомии, гистологии и эмбриологии. 1971. № 10. С. 45–50.
4. Утенькин А.А., Свешникова А.А. Упругие свойства костной компактной ткани как анизотропного материала // Проблемы прочности. 1971. № 3. С. 40–44.
5. Зайцев Д.В., Панфилов П.В. Прочностные свойства дентина и эмали зубов человека при одноосном сжатии // Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки. 2016. Т. 21. Вып. 3. С. 802–804.
6. Zaytsev D. Correction of some mechanical characteristics of human dentin under compression considering the shape effect // Materials Science and Engineering C. 2015. Vol. 49. P. 101–105.
7. Zaytsev D. Mechanical properties of human enamel under compression: On the feature of calculations // Materials Science and Engineering C. 2016. Vol. 62. P. 518–523.
8. Зыонг В.Л., Пыхалов А.А. Математическое моделирование и автоматизация обработки изображений сканирования твердых деформируемых тел с неоднородными свойствами материала и геометрии для построения их конечно-элементных моделей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 30–39.
9. Зыонг В.Л., Пыхалов А.А., Татарникова С.Р. Интерполяция геометрии и неоднородности материала деформируемых тел при построении их объемных моделей методом конечных элементов на основе сканирования компьютерным томографом // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 3 (55). С. 10–18.
10. Пыхалов А.А., Пашков В.П., Зыонг В.Л. Исследование точности численного решения методом конечных элементов анализа напряженно-деформированного состояния образцов из материалов с неоднородной структурой на основе данных компьютерного томографа и натурального эксперимента // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 4. С. 47–56. <https://doi.org/10.21285/18143520-2017-4-47-56>
11. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов / пер. с англ. А.А. Шестакова; под ред. Б.Е. Побери. М.: Мир, 1979. 392 с.
12. Зенкевич О. С. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир. 1975. 542 с.
13. Хофер М. Компьютерная томография. Базовое руководство. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Медицинская литература, 2008. 224 с.
14. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM). Part 2: Conformance. URL: <http://medical.nema.org/dicom> (20.11.2017).
15. Пыхалов А.А., Зыонг В.Л. Математическое моделирование для автоматизации обработки результатов сканирования деформируемых твердых тел сложной геометрической формы с неоднородными механическими характеристиками для построения их конечно-элементных моделей. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017661241 от 06.10.2017.
16. Белим С.В., Кутлуни П.Е. Выделение контуров на изображениях с помощью алгоритма кластеризации // Компьютерная оптика. 2015. Т. 39. № 1. С. 119–124. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-1-119-124>
17. Ahlberg J.H., Nilson E.N., Walsh J.L. The Theory of Splines and Their Applications: Mathematics in Science and Engineering: A Series of Monographs and Textbooks // Elsevier Science, 2016. Vol. 38. 296 p.
18. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений / пер. с англ. Х.Д. Икрамова. М.: Мир, 1980. 279 с.
19. Gurjeet Singh, Er. Harjinder singh. Study and Comparison of Various Techniques of Image Edge Detection // Journal



of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4. Issue 3 (Version 1). P. 908–912.

20. Титов И.О., Емельянов Г.М. Выделение контуров изображения движущегося объекта // Вестник Новгородского государственного университета. 2010. № 55. С. 27–31.

21. Kushagra S., López-Ortiz A., Munro J.I., Qiao A. Multi-pivot quicksort: Theory and experiments // Proceedings of the Meeting on Algorithm Engineering & Experiments. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2014. P. 47–60.

22. Liu X.S. et al. Accuracy of High-Resolution In Vivo Micro Magnetic Resonance Imaging for Measurements of Microstructural and Mechanical Properties of Human Distal Tibial Bone // Journal of Bone and Mineral Research. 2010. Vol. 25. No. 9. P. 2039–2050.

References

1. Pykhalov A.A., Milov A.E. *Kontaknaya zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornykh rotorov turbomashin* [Contact problem of static and dynamic analysis of rotor assembly turbomachines]. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2007, 192 p. (In Russian).

2. Pykhalov A.A., Pashkov V.P., Zotov I.N., Kuvshinov M.S. *Sposob opredeleniya znachenii modulya uprugosti i ego raspredeleniya v konstruktivnykh elementakh, obladayushchikh neopredelennymi svoystvami prochnosti* [A method for determining the values of the elasticity modulus and its distribution in structural elements with indefinite strength properties]. Patent RF, no. 2542918, 2015.

3. Uten'kin A.A., Sveshnikova A.A. Biomechanical properties of compact matter of bone. *Arkhiv anatomii, gistologii i embriologii* [Archive of anatomy, histology and embryology]. 1971, no. 10, pp. 45–50. (In Russian)

4. Uten'kin A.A., Sveshnikova A.A. Elastic properties of bone compact tissue as anisotropic material. *Problemy prochnosti* [Problems of Strength]. 1971, no. 3, pp. 40–44. (In Russian).

5. Zaitsev D.V., Panfilov P.V. Strength properties of human dentin and enamel under uniaxial compression. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya: Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Tambov University Reports. Series: Natural and Technical Sciences]. 2016, vol. 21, issue 3, pp. 802–804. (In Russian).

6. Zaitsev D. Correction of some mechanical characteristics of human dentin under compression considering the shape effect. *Materials Science and Engineering C*. 2015, vol. 49, pp. 101–105.

7. Zaitsev D. Mechanical properties of human enamel under compression: On the feature of calculations. *Materials Science and Engineering C*. 2016, vol. 62, pp. 518–523.

8. Zyong V.L., Pykhalov A.A. Mathematical modeling and scanned images processing automation of the solids with inhomogeneous material and geometry for constructing their finite-element models. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2017, no. 2 (54), pp. 30–39. (In Russian).

9. Zyong V.L., Pykhalov A.A., Tatarnikova S.R. Interpolation of geometry and inhomogeneity of material of deformable solids when constructing their 3d models with the finite elements method based on the computer tomograph scanning. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2017, no. 3 (55), pp. 10–18. (In Russian).

10. Pykhalov A.A., Pashkov V.P., Zyong V.L. Studying accuracy of finite element method-wise numerical solution of the stress-strain state analysis of samples made of inhomogeneous structure materials based on computerized tomography scanning and field experiment data. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 4, pp. 47–56. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/18143520-2017-4-47-56>

11. Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Application of the finite element method]. Moscow: Mir Publ., 1979, 392 p.

12. Zenkevich O. C. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. Moscow: Mir Publ., 1975, 542 p. (In Russian).

13. Khofer M. *Komp'yuternaya tomografiya. Bazovoe rukovodstvo* [Computer tomography. The basic guide]. Moscow: Meditsinskaya literature Publ., 2008, 224 p.

14. Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM). Part 2: Conformance. Available at: <http://medical.nema.org/dicom> (accessed 20 November 2017).

15. Pykhalov A.A., Zyong V.L. *Matematicheskoe modelirovanie dlya avtomatizatsii obrabotki rezul'tatov skanirovaniya deformiruemyykh tverdykh tel slozhnoi geometricheskoi formy s neodnorodnymi mekhanicheskimi kharakteristikami dlya postroeniya ikh konechno-elementnykh modelei* [Mathematical modeling for automation of the processing of scanning results of the deformable solids of complex geometric shape with inhomogeneous mechanical characteristics for their finite element models construction]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlya EVM* [Certificate of state registration of the computer program] no. 2017661241 of 6 October 2017 (In Russian).

16. Belim S.V., Kutlunin P.E. Boundary extraction in images using a clustering algorithm. *Komp'yuternaya optika* [Computer Optics]. 2015, vol. 39, no. 1, pp. 119–124. (In Russian). <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2015-39-1-119-124>

17. Ahlberg J.H., Nilson E.N., Walsh J. L. The Theory of Splines and Their Applications: Mathematics in Science and Engineering: A Series of Monographs and Textbooks. Elsevier Science, 2016, vol. 38, 296 p.

18. Forsait Dzh., Mal'kol'm M., Mouler K. *Mashinnye metody matematicheskikh vychislenii* [Computer methods of mathematical calculations]. Moscow: Mir Publ., 1980, 279 p.



19. Gurjeet Singh, Er. Harjinder singh. Study and Comparison of Various Techniques of Image Edge Detection. Journal of Engineering Research and Applications. 2014, vol. 4, issue 3 (Version 1), pp. 908–912.
20. Titov I.O., Emel'yanov G.M. Edge detection of the moving object image. *Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of Yaroslav the Wise Novgorod State University]. 2010, no. 55, pp. 27–31. (In Russian).
21. Kushagra S., López-Ortiz A., Munro J.I., Qiao A. Multi-pivot quicksort: Theory and experiments. Proceedings of the Meeting on Algorithm Engineering & Experiments. Society for Industrial and Applied Mathematics. 2014, pp. 47–60.
22. Liu X.S. et al. Accuracy of High-Resolution In Vivo Micro Magnetic Resonance Imaging for Measurements of Micro-structural and Mechanical Properties of Human Distal Tibial Bone. Journal of Bone and Mineral Research. 2010, vol. 25, no. 9, pp. 2039–2050.

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.942

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-112-121>

ИДЕНТИФИКАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ВЫРАБОТКИ ПАРА ПО КАНАЛАМ «ТЕМПЕРАТУРА В ПОВОРОТНОЙ КАМЕРЕ ТОПОЧНОГО УСТРОЙСТВА – КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА»

© В.Г. Хапусов¹, А.А. Ермаков², А.А. Подкорытов³

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. В качестве объекта исследования выбран котельный агрегат Иркутской теплоэлектроцентрали. В данной работе проведено изучение влияния температуры в поворотной камере котлоагрегата на качественные показатели процесса производства перегретого пара – паропроизводительность, давление пара на выходе, температуру насыщенного пара в барабане. **ЦЕЛЬЮ** данного исследования является разработка математической модели топочного устройства, учитывающей динамику объекта, что в свою очередь позволит точнее прогнозировать и управлять процессом выработки пара по сравнению с классическими системами автоматического управления.

МЕТОДЫ. Поскольку сложная структура объекта исследования не позволяет использовать классические методы оценки взаимосвязи параметров, можно только наблюдать реакцию выходных величин на изменение входных. Для идентификации процесса производства пара с условно неизвестной внутренней организацией предлагается применение методики Дж. Бокса и Г. Дженкинса (интегрированная модель авторегрессии – скользящего среднего). Для статистического анализа временных рядов был использован программный пакет Statistica 6. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Котлоагрегат был описан как динамический стохастический объект с неконтролируемыми возмущающими воздействиями. Экспериментально-статистическими методами получена математическая модель, позволяющая определить степень влияния температуры в поворотной камере на качественные показатели при выработке пара. **ВЫВОДЫ.** По выбранным каналам разработаны динамические стохастические модели. Проведена диагностическая проверка полученных моделей. Разработанные модели могут быть использованы для прогноза и управления процессом выработки пара.

Ключевые слова: топочное устройство, поворотная камера, качественные показатели, стохастическая модель, идентификация, оценивание, диагностическая проверка.

Информация о статье. Дата поступления 25 января 2018 г.; дата принятия к печати 14 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Хапусов В.Г., Ермаков А.А., Подкорытов А.А. Идентификация технологического процесса выработки пара по каналам «температура в поворотной камере топочного устройства – качественные показатели процесса» // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 112–121. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-112-121

IDENTIFICATION OF THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF STEAM PRODUCTION BY THE CHANNELS “TEMPERATURE IN THE COMBUSTION UNIT ROTARY CHAMBER – QUALITATIVE PARAMETERS OF THE PROCESS”

V. G. Khapusov, A.A. Ermakov, A.A. Podkorytov

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

¹Хапусов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: hapusov@yandex.ru

Vladimir G. Khapusov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Automation of Production Processes, e-mail: hapusov@yandex.ru

²Ермаков Андрей Андреевич, аспирант, e-mail: ermakov.istu@gmail.com

Andrey A. Ermakov, Postgraduate, e-mail: ermakov.istu@gmail.com

³Подкорытов Алексей Александрович, аспирант, e-mail: podkorytovleha@mail.ru

Aleksey A. Podkorytov, Postgraduate, e-mail: podkorytovleha@mail.ru



ABSTRACT. The object of research is the boiler unit of the Irkutsk combined heat and power plant (CHP). The paper studies the effect of temperature in the boiler unit rotary chamber on the qualitative parameters of the process of superheated steam production: steam capacity, steam pressure at the outlet and the temperature of saturated steam in the drum. The **PURPOSE** of this work is development of a mathematical model of a combustion unit taking into account the dynamics of the object that will allow more accurate prediction and control of the process of steam production as compared with classical automatic control systems. **METHODS.** Since the complex structure of the object of research does not allow to use the classical methods for estimating parameter interrelation we can only observe the reaction of output values on the variation of input values. It is proposed to use the methods of J. Box and G. Jenkins (integrated autoregressive moving average model) to identify the process of steam production with a conditionally unknown internal organization. The software package "Statistica 6" is used to perform the statistical analysis of time series. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The boiler unit is described as a dynamic stochastic object with uncontrollable disturbances. Using experimental and statistical methods, a mathematical model has been obtained that allows to determine the degree of temperature influence in the rotary chamber on qualitative parameters in steam production. **CONCLUSIONS.** Dynamic stochastic models have been developed by selected channels. The obtained models have been subjected to diagnostic testing. The developed models can be used for prediction and control of the process of steam production.

Keywords: *combustion chamber, rotary chamber, qualitative parameters, stochastic model, identification, estimation, diagnostic testing*

Information about the article. Received January 25, 2018; accepted for publication February 12, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Khapusov V.G., Ermakov A.A., Podkorytov A.A. Identification of the technological process of steam production by the channels "temperature in the combustion unit rotary chamber – qualitative parameters of the process". Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 112–121. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-112-121

Введение

Рациональное использование ресурсов является залогом эффективного и безопасного производства. Развитие производственной системы, усовершенствование технологии производства и управления котельными установками являются актуальными вопросами для специалистов, работающих в области энергетики и автоматизации технологических процессов.

Системы управления, построенные на математических моделях объектов, позволяют получать максимальное качество регулирования и минимальную инерционность процесса. Такие модели позволяют также учитывать динамику объектов, что делает прогноз и управление более точными по сравнению с классическими системами автоматического управления [1].

При автоматизированном проектировании необходимо создавать динамическую математическую модель котла, используемую для вычисления параметров настройки регуляторов систем автоматического управления, анализа опасных отклонений температуры перегрева пара и других параметров, оптимизации тепловой схемы котла [2].

На данный момент за оператором остаются функции управления еще не автоматизированными операциями и общего наблюдения за ходом технологического процесса. Соответственно наибольшее развитие получает информационная часть системы, основная функция которой заключается в выдаче оператору всей необходимой информации⁴. В перспективе эффективное управление может быть достигнуто уменьшением доли участия оператора в управлении установкой и путем передачи его компетенций интеллектуальным системам на основе математических моделей технологического процесса [3].

Целью данного исследования являлось построение динамических стохастических моделей управления по каналам: «температура в поворотной камере топки – паропроизводительность котла», «температура в поворотной камере топки – давление перегретого пара на выходе из котла», «температура в поворотной камере топки – температура насыщенного пара».

⁴Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов. М.: ИД МЭИ, 2004. 400 с. / Rotach V.Ya. The theory of automatic control: Textbook for universities. Moscow: ID MEI Publ., 2004, 400 p.



В качестве объекта исследования был выбран котельный агрегат БКЗ-420-140-6, оборудованный четырьмя пылеприготовительными установками. По компоновке котел одnobарбанный, вертикально-водотрубный с естественной циркуляцией, предназначен для сжигания бурых углей Азейского месторождения [4]. Изменение частоты вращения питателей сырого угля является косвенным параметром, характеризующим расход топлива (расход воздушно-угольной смеси). Подача топлива в камеру сгорания обеспечивается 8 инжекторами (горелками) [5].

Методы и результаты

Для обеспечения контроля объема производства пара требовалось изучить степень влияния частоты вращения питателей сырого угля (ПСУ) на непосредственно массовый расход перегретого пара за котлом [6]. Изменение частоты вращения питателей сырого угля может относиться как к управляющим, так и возмущающим воздействиям в зависимости от требований системы управления [7].

Рассматривалась пылеугольная топка, в которую подавалась подогретая угольная пыль и воздух. Для получения информации о динамике системы данные наблюдений за нормальным ходом процесса выработки пара, собранные в течение 5 ч с интервалом отсчета 10 с, были подвергнуты статистическому анализу.

В период пассивного эксперимента контролировались следующие технологические факторы:

- $T_{\text{л}}$ – температура уходящих газов в поворотной камере с левой стороны;
- $T_{\text{п}}$ – температура уходящих газов в поворотной камере с правой стороны;
- F – паропроизводительность котла;
- P – давление перегретого пара на выходе;
- S – температура насыщенного пара (до растопочного впрыска).

Для исследования влияния температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства на давление и объем выработки пара были использованы методы корреляционного и регрессионного анализа [8].

Исследуемые временные ряды содержали 1800 пар последовательных наблюдений. Исходной информацией для исследования послужили временные ряды: $Y_{t,F}$ – паропроизводительность котла; $Y_{t,P}$ – давление перегретого пара на выходе; $Y_{t,S}$ – температура насыщенного пара; $X_{t,\text{л}}$ – температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с левой стороны печи; $X_{t,\text{п}}$ – температура уходящих газов в поворотной камере топочного устройства с правой стороны. В качестве примера на рис. 1 приведены временные ряды температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства слева и паропроизводительности котла в стандартизированном виде.

С целью приведения временных рядов к стационарному виду согласно методике, приведенной в работе [9], для каждого ряда были получены разностные временные ряды с помощью оператора взятия разностей ∇^d :

$$x_t = \nabla^d \cdot X_t^*, y_t = \nabla^d \cdot Y_t^*, d > 0,$$

где d – порядок разности; x_t, y_t – нормированные значения временных рядов; X_t^*, Y_t^* – наблюдаемые данные, в свою очередь рассчитываемые как

$$X_t^* = (X_t - \bar{X}_t) / \sigma_x, Y_t^* = (Y_t - \bar{Y}_t) / \sigma_y.$$

Здесь $\bar{X}_t, \bar{Y}_t$ – средние значения ряда; σ_x, σ_y – среднеквадратическое отклонение.

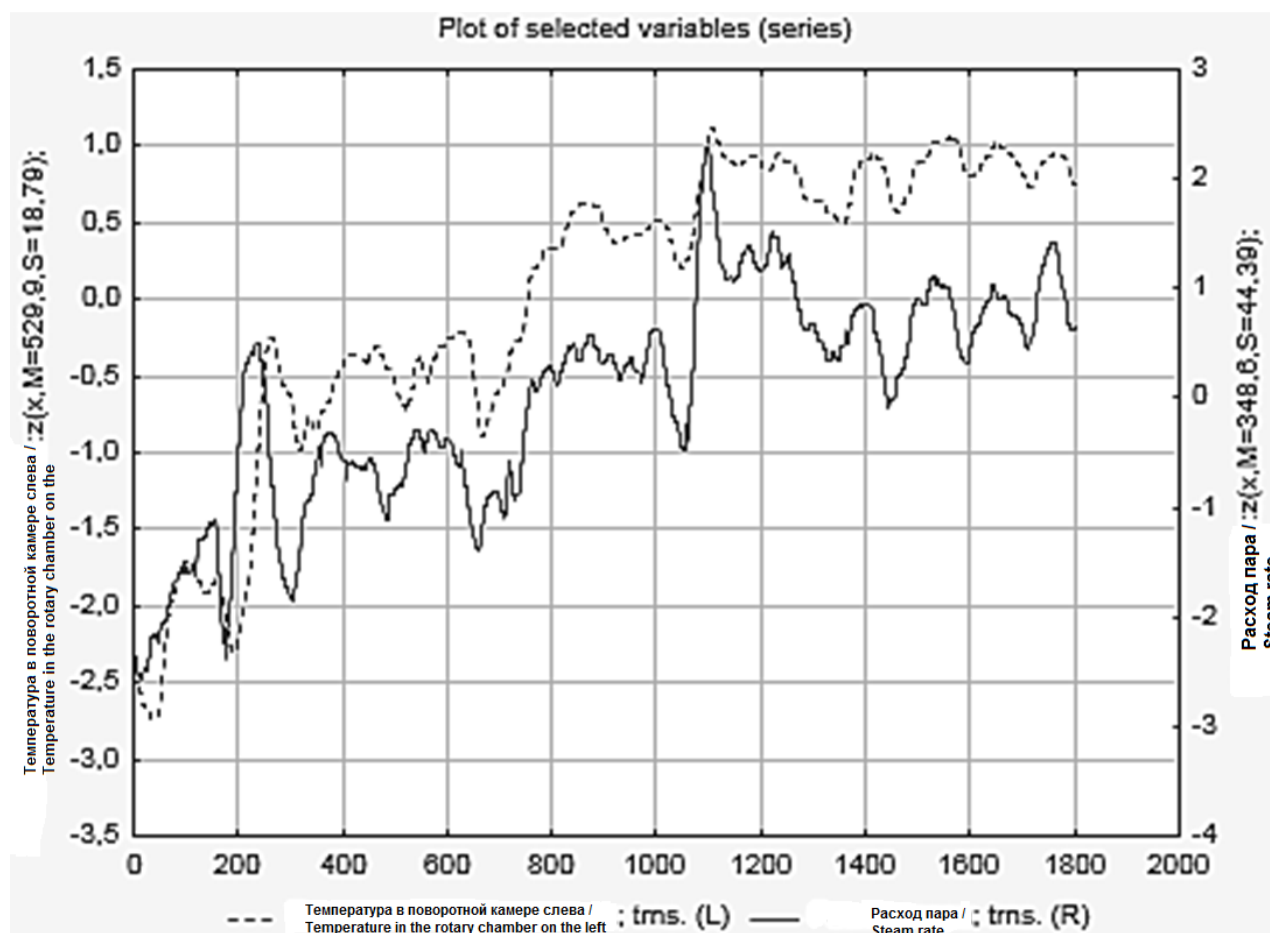


Рис. 1. Временные ряды температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства слева (Тл) и паропроизводительности котла (F)

Fig. 1. Time series of the flue gases temperature in the rotary chamber of the combustion unit on the left (Tl) and boiler output (F)

Приведение рядов к стационарному виду позволяет использовать метод взаимных корреляционных функций для определения в структуре модели таких временных интервалов, для которых коэффициент связи между температурой уходящих газов в поворотной камере топочного устройства и паропроизводительностью имеет максимальное значение. Для ориентировочной оценки максимального сдвига взаимно корреляционных функций учитывались экспериментальные данные, приведенные в работе [10].

Взаимно-корреляционная функция (ВКФ) «паропроизводительность – температура в поворотной камере» показывает сильную зависимость временных рядов (рис. 2).

Визуальный анализ ВКФ не позволяет сделать однозначного вывода о тех временных интервалах, при которых тепло, вырабатываемое в поворотной камере, существенно влияет на паропроизводительность, так как механизм взаимодействия завуалирован коррелированностью значений входного ряда, однако он помогает определить значимость коэффициентов взаимной корреляции.

Для устранения эффекта коррелированности авторы статьи [11] предлагают к входному и выходному ряду применить дополнительную процедуру выравнивания на основе построения для этих рядов моделей авторегрессии и скользящего среднего (АРСС):

$$\alpha_t = x_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i x_{t-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_{t-j} \alpha_{t-j};$$

$$\beta_t = y_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_{t-j} \beta_{t-j},$$

где α_t, β_t – выровненные ряды соответственно для входных и выходных разностных рядов; $\sum_{i=1}^p \Phi_i$ – значения параметров для авторегрессионной модели; $\sum_{i=1}^q \Theta$ – значения параметров для модели скользящего среднего; p – порядок модели авторегрессии; q – порядок модели скользящего среднего.

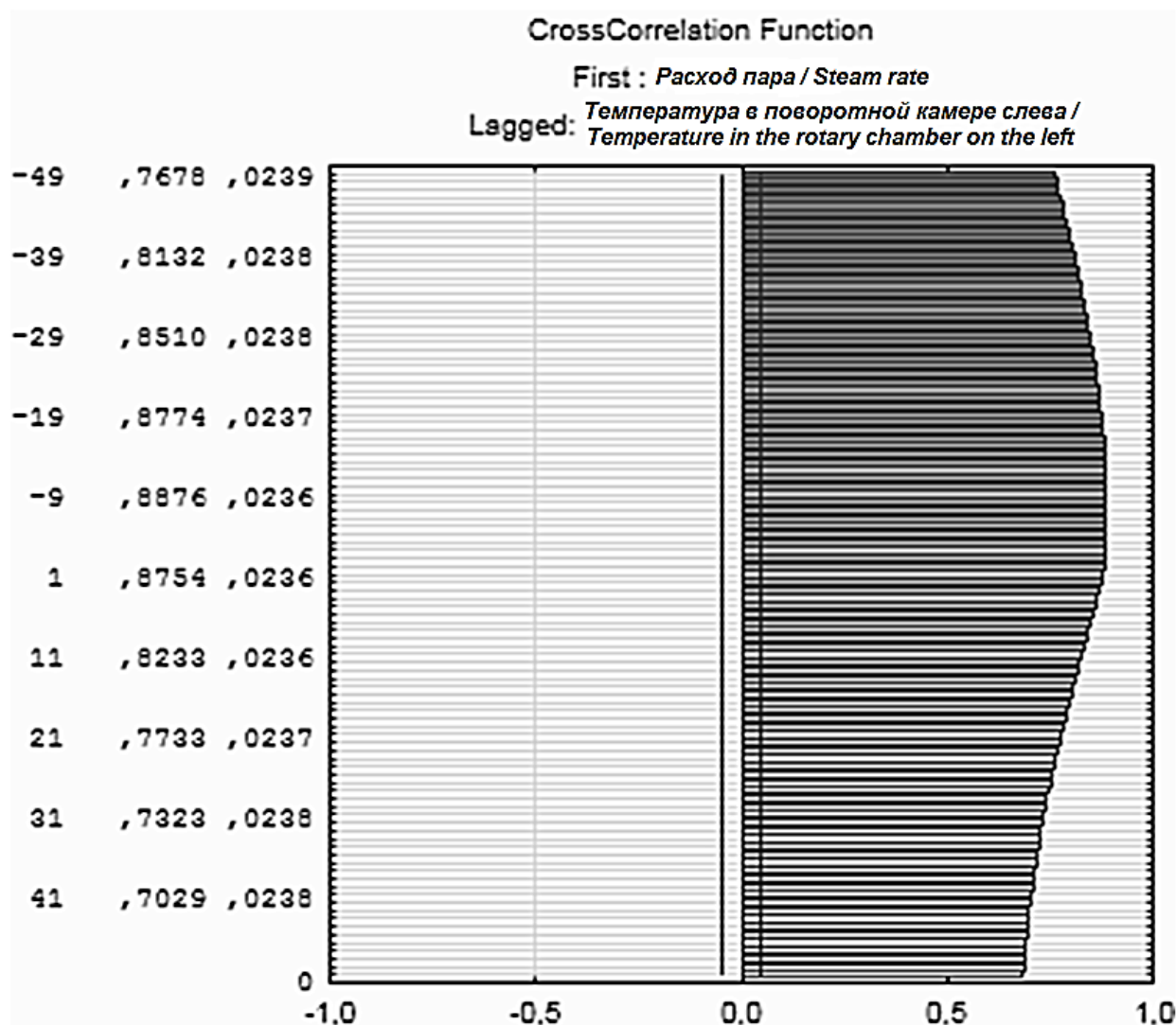


Рис. 2. Выборочная ВКФ по наблюдаемым данным
Fig. 2. Sample cross-correlation function (CCF) by the observed data

Для получения оценок p, q, Φ_i, Θ_j был применен нелинейный алгоритм наименьших квадратов [12]. В качестве примера рассмотрим канал «температура в поворотной камере – температура насыщенного пара». Взаимно-корреляционная функция, полученная по преобразованным (выравненным) рядам, представлена на рис. 3.

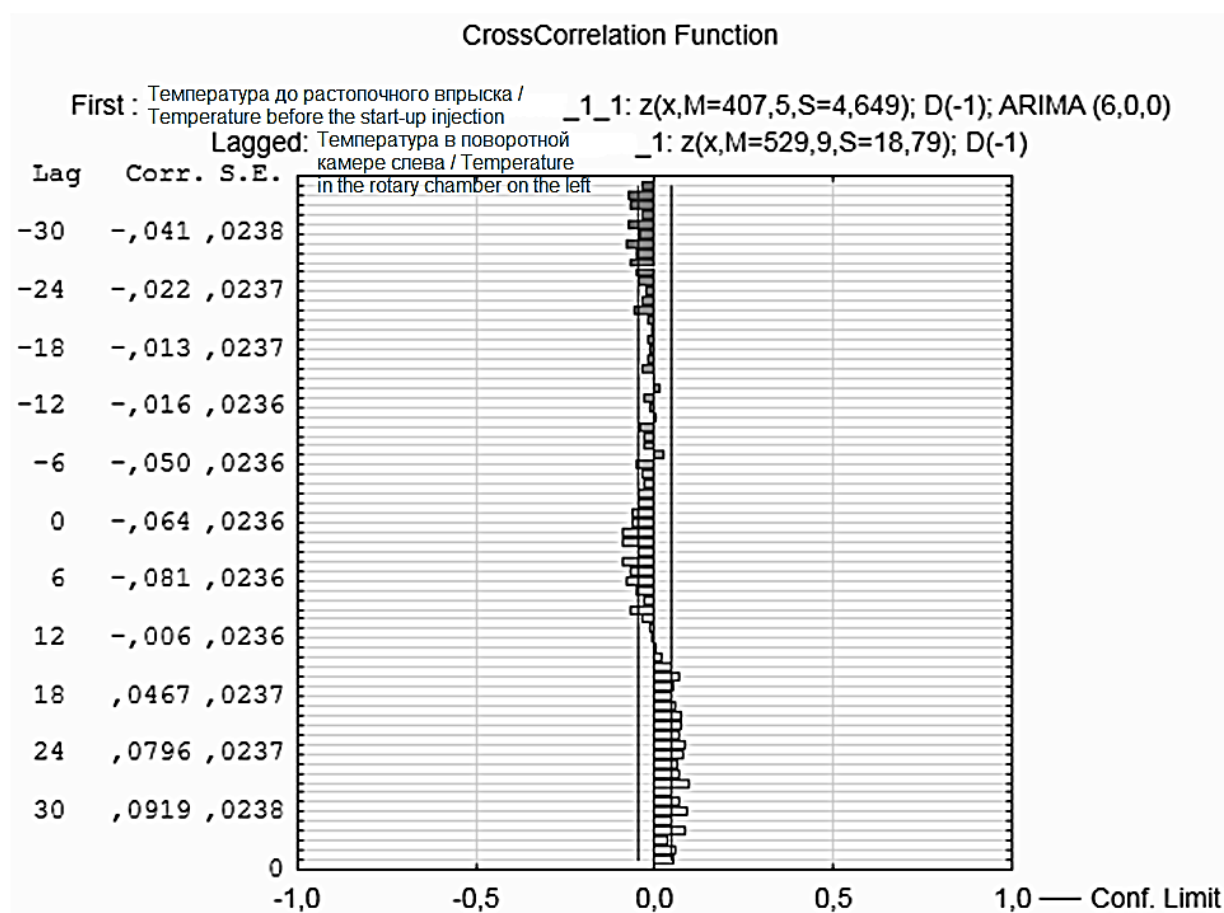


Рис. 3. Выборочная ВКФ $R_{xy}(k)$ по преобразованным данным
Fig. 3. Sample CCF $R_{xy}(k)$ by the transformed data

В табл. 1 приведены выборочные взаимные корреляционные функции $r_{\alpha\beta}(k)$ после предварительного выравнивания спектра. Приближенное значение стандартной ошибки выборочной взаимной корреляции $\sigma(r) = 0,024$. Значения коэффициентов корреляции, вдвое превышающие значение стандартной ошибки, являются статистически значимыми.

Сравнение коэффициентов взаимной корреляции с их стандартными ошибками $\sigma(r)$ показывает, что паропроизводительность тесно связана со значениями температуры уходящих газов в поворотной камере в диапазоне 0–110 с. Давление пара связано с температурой уходящих газов в поворотной камере в диапазоне 0–50 с, температура насыщенного пара с температурой уходящих газов в поворотной камере – в диапазоне 0–340 с.

При построении моделей, характеризующих влияние расхода дымовых газов на температуру уходящих газов в поворотной камере топочного устройства в работе [13] высказывается предположение, что структура моделей относится к классу линейных и, следовательно, может быть использован принцип суперпозиции.

Привязка модели к наблюдаемым значениям временных рядов осуществлялась в несколько этапов: сначала была проведена пробная идентификация на основе анализа приближенной функции отклика на единичный импульс, затем применена процедура нелинейного оценивания пробной модели и диагностическая проверка с использованием критерия согласия χ^2 .



Таблица 1

Выборочная ВКФ по преобразованным данным

Table 1

Sample CCF by the transformed data

Вход / Input	Вы- ход / Out- put	Сдвиг k / Shift k	Коэффициент взаимной корреляции $r_{\alpha\beta}(K)$ / Cross-correlation coefficient $r_{\alpha\beta}(K)$						Ошиб- ка $\sigma(r)$ / Error $\sigma(r)$
T_n	F	0–5	-0,041	-0,041	-0,075	-0,055	-0,078	-0,088	0,024
		6–11	-0,041	-0,076	-0,075	-0,112	-0,034	-0,078	
	P	0–5	0,132	0,098	0,089	0,123	0,081	0,055	
		0–5	-0,063	-0,090	-0,090	-0,047	-0,090	-0,067	
	S	16–21	0,069	0,054	0,046	0,054	0,074	0,071	
		23–28	0,083	0,079	0,060	0,070	0,096	0,045	
T_n	F	0–5	-0,028	-0,058	-0,071	-0,054	-0,088	-0,057	
		6–11	-0,071	-0,051	-0,068	-0,107	-0,085	-0,065	
	P	0–5	0,147	0,065	0,128	0,095	0,096	0,090	
		5–10	-0,063	-0,025	-0,072	-0,068	-0,035	-0,037	
	S	19–24	0,090	0,014	0,081	0,043	0,079	0,076	
		29–34	0,131	0,063	0,083	0,074	0,075	0,070	

Динамические стохастические модели влияния температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства на паропроизводительность и давление пара были получены с использованием методики Бокса – Дженкинса в классе моделей:

$$y(t) = \frac{\omega(B)}{\delta(B)} x_{t-b} + n_t;$$

$$\delta(B) = 1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r,$$

$$\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2 - \dots - \omega_s B^s$$

где B – оператор сдвига назад на один шаг; b – параметр запаздывания.

С целью получения более точной модели в уравнениях была учтена шумовая составляющая n_t , которая описывается в классе моделей АРПСС:

$$n_t = y_t - y_t^*,$$

где y_t – наблюдаемый временной ряд; y_t^* – значения ряда, получаемые по модели

$$n_t = \frac{\theta(B)}{\phi(B)} a_t,$$

где a_t – остаточная ошибка.

Динамические стохастические модели, полученные соответственно для паропроизводительности, давления перегретого пара и температуры насыщенного пара, имеют вид:

– в зависимости от температуры в поворотной камере слева:



$$\begin{aligned} & (1 - 0,38 B - 0,19 B^2 - 0,11 B^3 - 0,037 B^4 - 0,66 B^5 - 0,51 B^6) \nabla F = \\ & \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \\ & = (-0,1021) \nabla \text{Тл} (t-2) - 0,0681 \nabla \text{Тл} (t-9) + 0,083 \nabla \text{Тл} (t-68) + 0,09 \nabla \text{Тл} (t-114) + n_t; n_t = a_t; \\ & \quad \pm 0,032 \quad \pm 0,032 \quad \pm 0,032 \quad \pm 0,032 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (1 + 0,05 B - 0,049 B^2 - 0,096 B^3 - 0,098 B^4 - 0,157 B^5 - 0,087 B^6) \nabla P = \\ & \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \\ & = (0,793 + 0,303 \cdot B) \nabla \text{Тл} (t-0) + n_t; n_t = a_t; \\ & \quad \pm 0,14 \quad \pm 0,14 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (1 - 0,14 B - 0,1 B^2 - 0,22 B^3 - 0,23 B^4 - 0,22 B^5 - 0,11 B^6 - 0,06 B^7) \nabla S = \\ & \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \\ & = (-0,189 - 0,185 \cdot B) \nabla \text{Тл} (t-0) + 0,232 \nabla \text{Тл} (t-15) + 0,225 \nabla \text{Тл} (t-16) + 0,238 \nabla \text{Тл} (t-20) + \\ & \quad \pm 0,14 \quad \pm 0,14 \quad \pm 0,14 \quad \pm 0,14 \quad \pm 0,14 \\ & + 0,142 \nabla \text{Тл} (t-21) + n_t; (1 - 0,066 B^6 - 0,075 B^7 - 0,053 B^8) n_t = a_t; \\ & \quad \pm 0,14 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \end{aligned}$$

– в зависимости от температуры в поворотной камере справа:

$$\begin{aligned} & (1 - 0,38 B - 0,19 B^2 - 0,11 B^3 - 0,037 B^4 - 0,66 B^5 - 0,51 B^6) \nabla F = \\ & \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \\ & = (-0,068 - 0,064 B) \nabla \text{Тл} (t-1) - 0,0736 \nabla \text{Тл} (t-9) + 0,070 \nabla \text{Тл} (t-65) + n_t; n_t = a_t; \\ & \quad \pm 0,028 \quad \pm 0,028 \quad \pm 0,028 \quad \pm 0,028 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (1 + 0,05 B - 0,049 B^2 - 0,096 B^3 - 0,098 B^4 - 0,157 B^5 - 0,087 B^6) \nabla P = \\ & \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \\ & = 0,762 \nabla \text{Тл} (t-0) + 0,27 \nabla \text{Тл} (t-2) + n_t; n_t = a_t; \\ & \quad \pm 0,12 \quad \pm 0,12 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & (1 - 0,142 B - 0,1 B^2 - 0,22 B^3 - 0,24 B^4 - 0,227 B^5 - 0,117 B^6 - 0,07 B^7) \nabla S = \\ & \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \\ & = + 0,15 \nabla \text{Тл} (t-5) + 0,333 \nabla \text{Тл} (t-19) + 0,138 \nabla \text{Тл} (t-21) + n_t; \\ & \quad \pm 0,14 \quad \pm 0,14 \quad \pm 0,14 \\ & (1 - 0,055 B^6 - 0,073 B^7 - 0,052 B^8) n_t = a_t. \\ & \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \end{aligned}$$

Здесь ∇ – первые разности, а значения под коэффициентами – их стандартные ошибки.

Диагностическая проверка

Полученная модель была проанализирована на адекватность реальному процессу с помощью диагностической проверки, проведенной в два этапа: сначала была вычислена χ^2 -статистика для значений автокорреляционной функции остаточных ошибок $r_{\alpha\alpha}(k)$:

$$Q = (N - s - b - r) \sum_{k=1}^k r_{\alpha\alpha}^2(k),$$

где N – число наблюдений; k – максимальная задержка автокорреляций и взаимных корреляций; s – число «правосторонних» параметров динамической стохастической модели; r – число «левосторонних» параметров.

Далее вычислялась χ^2 -статистика с использованием взаимных корреляционных функций $r_{\alpha\beta}(k)$ между выровненным входным рядом α_t и рядом остаточных ошибок a_t :

$$H = (N - s - b - r) \sum_{k=1}^k r_{\alpha\alpha}^2(k).$$



В первом случае Q сравнивается с χ^2 -распределением при значении $K-p-q$ -степеней свободы, а во втором – H сравнивается с χ^2 -распределением при значении $K-r-s$ -степеней свободы. В табл. 2 приведены значения коэффициентов χ^2 -статистики диагностической проверки по автокорреляционной и взаимной корреляционной функциям.

Таблица 2

Значения коэффициентов χ^2 -статистики

Table 2

Values of the coefficients of χ^2 -statistics

Вход / Input	Выход / Output	Число степеней свободы / Number of degrees of freedom	H	Число степеней свободы / Number of degrees of freedom	Q
Тл	F	31	38,5	9	16,12
	P	26	26,61	9	9,06
	S	25	26,625	8	8,75
Тп	F	31	36,4	9	16,3
	P	28	17,72	9	8,32
	S	25	29,12	8	9,1

Полученные экспериментальные значения χ^2 -статистики меньше теоретических (табличных), что подтверждает статистическую гипотезу адекватности моделей процессу.

Заключение

В результате проведенных исследований получены модели, позволяющие оценить влияние температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства на паропроизводительность, давление перегретого пара и температуру насыщенного пара в барабане.

Диагностическая проверка по автокорреляционным и взаимно корреляционным функциям с использованием значений χ^2 -статистики не дает оснований сомневаться в адекватности модели.

Модели могут быть использованы для прогноза и управления качественными показателями производства пара. При увеличении температуры уходящих газов в поворотной камере топочного устройства возрастает давление и расход пара за котлом, что в конечном итоге определяет производительность барабанного котельного агрегата.

Библиографический список

1. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. 4-е изд. М.: ИД МЭИ, 2007. 352 с.
2. Оскорбин Н.С., Беднаржевский В.С. Разработка пакетов и комплексов программ в теплоэнергетике // Известия Алтайского государственного университета. 2004. № 1 (31). С. 58–62.
3. Аракелян Э.К., Пикина Г.А. Оптимизация и оптимальное управление / под ред. Т.Е. Щедркиной; 2-е изд. М.: ИД МЭИ, 2007. 408 с.
4. Волошенко А.В. Принципиальные схемы паровых котлов и топливоподачи. Томск: Изд-во НИТПУ, 2011. 100 с.
5. Серов Е.П., Корольков Б.П. Динамика парогенераторов. М.: Энергоиздат, 1981. 409 с.
6. Хапусов В.Г., Баев А.В. Смешанные авторегрессионные модели и прогнозирование процесса выработки пара // Вестник ИргТУ. 2014. № 12 (110). С. 29–34.
7. Хапусов В.Г., Ермаков А.А. Динамические стохастические модели управления котлоагрегатом по каналу «обо-



роты питателей сырого угля – расход пара» // Вестник ИрГТУ. 2017. № 8. С. 65–73. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-8-65-72>

8. Хапусов В. Г. Моделирование систем. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 212 с.

9. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco: Holden-Day, 1976.

10. Шорохов В.А. Смольников А.П. Разработка динамической модели многосвязной АСР пылеугольного блока с прямым вдуванием пыли // Теплоэнергетика. 2009. № 10. С. 56–61.

11. Хапусов В.Г. Ермаков А.А. Динамические стохастические модели по каналу «частота вращения питателей сырого угля – содержание кислорода в уходящих газах» в производстве пара // Вестник ИрГТУ. 2016. № 2 (109). С. 45–50.

12. Хапусов В.Г., Ершов П.Р., Ермаков А.А. Прогнозирование качественных показателей топочной камеры с учетом упреждающего индикатора по расходу топлива в процессе производства пара // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 7. С. 87–94. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-87-94>

13. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time Series Analysis: Forecasting and Control, 3rd ed. N.J, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994.

References

1. Pletnev G.P. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv v teploenergetike* [Automation of flow processes and productions in heat power engineering]. Moscow: ID MEI Publ., 2007, 352 p. (In Russian).

2. Oskorbin N.S., Bednarzhevskiy V.S. Development of software packages in heat power engineering. *Izvestiya Altayskogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestiya of Altai State University]. 2004, no. 1 (31), pp. 58–62. (In Russian).

3. Arakelyan E.K., Pikina G.A. *Optimizatsiya i optimal'noe upravlenie* [Optimization and optimal control]. Moscow: ID MEI Publ., 2007, 408 p. (In Russian).

4. Voloshenko A.V. *Printsipial'nye skhemy parovykh kotlov i toplivopodach* [Schematic diagrams of steam boilers and fuel feeders]. Tomsk: Nacional'nyy issledovatel'skiy Tomskiy politehnicheskij universitet Publ., 2011, 100 p. (In Russian).

5. Serov E.P., Korol'kov B.P. *Dinamika parogeneratorov* [Dynamics of steam generators.]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981, 409 p. (In Russian).

6. Khapusov V.G., Baev A.V. Mixed autoregressive models and steam production forecast. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 12 (110), pp. 29–34. (In Russian).

7. Khapusov V.G., Ermakov A.A. Dynamic stochastic control models of a package boiler by the channel “coal feeder rotations - steam consumption”. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, no. 8, pp. 65–73. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-8-65-72>

8. Khapusov V.G. *Modelirovanie sistem* [System modeling]. Irkutsk: Irkutskiy gosudarstvennyy tehnikeskij universitet Publ., 2007, 212 p. (In Russian).

9. Box G.E.P., Jenkins G.M. Time Series Analysis: Forecasting and Control. San Francisco: Holden-Day, 1976.

10. Shorokhov 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* [Heat Power Engineering]. 2009, no. 10, pp. 56–61. (In Russian).

11. Khapusov V.G. Ermakov A.A. Dynamic stochastic models by the channel “rotation speed of raw coal feeders – oxygen content in flue gases” in steam production. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 2 (109), pp. 45–50. (In Russian).

12. Khapusov V.G., Ershov P.R., Ermakov A.A. Forecasting furnace chamber qualitative parameters with regard to the predictive indicator on fuel consumption under steam production. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 7, pp. 87–94. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-7-87-94>

13. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time Series Analysis: Forecasting and Control, 3rd ed. N.J, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1994.

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 620.424.1:338.45

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-122-137>

ПРЕДЕЛЬНЫЕ ИЗДЕРЖКИ И ХАРАКТЕРИСТИКА ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПОСТАВЩИКА-ЦЕНОПОЛУЧАТЕЛЯ ДЛЯ РЫНКА НА СУТКИ ВПЕРЕД В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

© М.Ю. Васильев¹

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ. Статья посвящена микроэкономике электроэнергетики с акцентом на технические аспекты производства электроэнергии на тепловых электростанциях. **ЦЕЛЬ.** На примере конкретной энергетической турбины исследовать особенности получения характеристики предельных издержек поставщика электрической энергии и характеристик предложения, соответствующих этим издержкам, для рынка на сутки вперед. Подобные характеристики представляют ценность как для задач теоретического исследования рынков в электроэнергетике, так и для разработки рыночных структур и применяемого в отрасли регулирования, а также для практической работы генерирующих компаний на рынке на сутки вперед и балансирующем рынке. **МЕТОДЫ.** В качестве исходных данных были использованы энергетические характеристики котла и турбины Т-185/220-130, работающей в конденсационном режиме. Для получения характеристик краткосрочных предельных издержек и характеристик предложения ценополучателя применено математическое моделирование. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.** Установлено, что функция предельных издержек поставщика может зависеть от задаваемого электростанции режима работы, который в свою очередь определяется по результатам работы рынка. Такая обратная зависимость возникает, если в рассматриваемом временном интервале меняется состав включенного оборудования и это изменение влечет за собой дополнительные затраты. Показано, что функция предельных издержек поставщика электроэнергии на рынке на сутки вперед может иметь убывающие участки в силу роста коэффициента полезного действия энергетического оборудования при росте нагрузки. При этом характеристика предложения ценополучателя не совпадает с функцией предельных издержек и может быть не определена не только в области мощностей ниже технического минимума, но и в области технически достижимых значений выдаваемой электрической мощности. Отмечено, что при получении характеристик предложения поставщиков-ценополучателей необходимо учитывать ограничения на краткосрочные удельные издержки и что количество участков характеристики предложения ценополучателя может не зависеть от количества энергоблоков тепловой электростанции.

Ключевые слова: электроэнергетика, тепловые электростанции, рынок на сутки вперед, характеристика предложения, предельные издержки, совершенная конкуренция, структура рынков в электроэнергетике.

Информация о статье. Дата поступления 24 января 2018 г.; дата принятия к печати 19 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Васильев М.Ю. Предельные издержки и характеристика предложения поставщика-ценополучателя для рынка на сутки вперед в электроэнергетике // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 122–137. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-122-137

MARGINAL COSTS AND A PRICETAKING PRODUCER SUPPLY FUNCTION IN A DAY-AHEAD MARKET IN ELECTRIC POWER INDUSTRY

M.Yu. Vasiliev

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The paper is devoted to microeconomics of electric power industry with the focus on the technical aspects of electric energy production by thermal power plants. The **PURPOSE** of the paper is to study the features of calculating electrical energy supplier marginal costs and a corresponding supply curve for a day-ahead market on example of a specific power turbine. Such supply curves are important for theoretical market research in electric power industry, market

¹Васильев Михаил Юрьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории реформирования электроэнергетики, e-mail: mikhail-vasilyev@yandex.ru

Mikhail Yu. Vasiliev, Candidate of technical sciences, Researcher of the Laboratory of Power Engineering Reformation, e-mail: mikhail-vasilyev@yandex.ru



design, regulation applied in the industry as well as for accurate operation of generation companies on a day-ahead market and balancing market. **METHODS.** The output performance of the steam boiler and the turbine T-185/220-130 operating in a condensing mode has been used as input data. Mathematical modeling is applied to obtain short-term marginal costs (STMC) and a supply curve of a pricetaker. **RESULTS AND CONCLUSIONS.** It is shown that the function of short-term marginal costs of a supplier can depend on the plant operation mode which is determined by the market results. This inverse dependence arises if the composition of enabled aggregates changes within the time interval under consideration and this change causes additional costs. It is also shown that the function of short-term marginal costs of the energy supplier at the day-ahead market can have decreasing intervals due to the fact that energy equipment efficiency factor grows alongside with the load. In this case the supply curve of the pricetaker does not coincide with the function of marginal costs and can be ill-defined both in the range of output below the minimum safe output and within the range of technically achievable values of output capacity. It is also noted that it is important to take into account the limitations on short-term specific costs when calculating the supply function of suppliers-pricetakers. Moreover, the number of segments of the supply function of the pricetaker does not depend on the amount of CHP power units.

Keywords: *electric power industry, thermal power plants, day-ahead market, supply function, marginal costs, perfect competition, electricity market design*

Information about the article. Received January 24, 2018; accepted for publication February 19, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Vasiliev M.Yu. Marginal costs and a pricetaking producer supply function in a day-ahead market in electric power industry. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 122–137. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-122-137

Введение

Вопрос о соответствии затрат поставщиков электроэнергии и их характеристик (функций) предложения актуален как минимум для нескольких направлений. Во-первых, в экономико-теоретических исследованиях в электроэнергетике, в частности, в задачах моделирования условий совершенной конкуренции используются характеристики предложения поставщиков-ценополучателей. И от того, насколько качественно заданные характеристики отображают издержки поставщиков, зависят выводы в отношении процессов на всем рынке. Из этого ряда задач формируются разделы, посвященные разработке и оптимизации структуры рынков, их регулированию, а также антимонопольной политике.

Во-вторых, для практической работы на рынке электроэнергии генерирующие компании заинтересованы в том, чтобы формировать свою стратегию поведения и заявки, исходя из знаний о своих издержках. Это позволит избежать убыточных для компании режимов и увеличить прибыль.

Хотя вопрос о соответствии предло-

жения поставщиков электроэнергии их издержкам весьма важен, научная база в этой части проработана довольно слабо. Исследователи рынков и регулирования электроэнергетики нечасто углубляются в анализ издержек, мощности и зависимости этих издержек от загрузки/спроса, графика нагрузки и прочих условий и ограничений, характерных для разных ситуаций.

В настоящей статье приводится краткий обзор ключевых публикаций по вопросу вычисления предельных издержек поставщиков электроэнергии и их соответствия характеристикам предложения (ХП). На примере характеристики турбины Т-185/220-130, работающей в конденсационном режиме в составе моноблока, дубль-блока и двух абстрактных теплоэлектростанций (с одним моноблоком и с четырьмя одинаковыми моноблоками), рассматривается процесс получения соответствующих издержкам ХП для рынка на сутки вперед и исследуются некоторые свойства этих характеристик.

Обзор ключевых публикаций

Анализ литературы по заданной теме показывает, что существуют сложившиеся представления по поводу вида и

свойств характеристик предложения поставщиков электроэнергии в условиях совершенной конкуренции. Функции предло-



жения поставщиков электроэнергии и мощности часто описаны в виде:

- средней цены за единицу производимой электростанцией электроэнергии или поставляемой мощности (например, заявки для конкурентного отбора мощности в России);

- ступенчатой функции. На оптовом рынке электроэнергии и мощности в РФ заявка одного поставщика по группе точек поставки на рынке на сутки вперед и балансирующем рынке состоит не более чем из трех ступеней (согласно п. 3.2.2 «Регламента подачи ценовых заявок участниками оптового рынка»²);

- монотонно-возрастающей зависимости цены от мощности или объема производства.

Общие часто подразумеваемые свойства функций предельных издержек поставщиков заключаются в следующем:

- функция определена на всем диапазоне – от нуля (технического/технологического минимума) до номинальной мощности станции, или от нуля до максимальной выработки станции;

- функция неубывающая. Предельные издержки, соответствующие большим значениям мощности/выработки, не могут быть меньше тех, что соответствуют меньшим значениям;

- на рынке совершенной конкуренции или при условии, что поставщик не манипулирует рынком, функция предложения совпадает с функцией предельных издержек;

- издержки однозначны, независимы от результатов и условий работы рынка.

Эти допущения наблюдаются как в теоретических работах, ставших научной основой для организации и регулирования современных рынков электроэнергии в разных странах, так и в практике регулирования. В России требования определенно-

сти на всем диапазоне и неубывания заявок и, следовательно, функций предложения заложено в нормативно-правовой базе. Кратко рассмотрим, как это отражено в ключевых публикациях об организации и регулировании рынков в электроэнергетике.

Например, в работе [1] утверждает-ся, что «кривая предложения ценопринимающего поставщика и кривая маржинальных затрат совпадают». Автор отмечает, что «Кривые предложения отдельных агрегатов почти всегда имеют вид “хоккейных клюшек”. То есть они немного возрастают (или же идут горизонтально) до точки, при которой достигается предельная величина вырабатываемой мощности, а затем принимают вид вертикальных прямых» (рис. 1). Заметим, что автор не конкретизирует, к какому рынку относится рассматриваемая им «кривая маржинальных затрат». Технические минимумы не оговариваются – функция начинается у оси ординат, то есть агрегат, предположительно, имеет возможность предложить близкие к нулю объемы генерации, и это будет соответствовать предельным издержкам. Автор не рассматривает процесс получения «кривых маржинальных затрат» из энергетических характеристик оборудования станции или других исходных данных.

Авторы работы [2] также не вычисляют функцию предложения станции из исходных данных реальных блоков. Они вводят ее со ссылкой на некую «типичную краткосрочную функцию издержек», которая считается непрерывно дифференцируемой и выпуклой вследствие закона убывающей предельной полезности. Получаемая в результате функция предельных издержек определена на всем диапазоне, она непрерывная и монотонно возрастающая. Интересно, что затраты на персонал авторы относят к переменным издержкам.

²Регламент подачи ценовых заявок участниками оптового рынка. Приложение 5 к Договору о присоединении к торговой системе оптового рынка (с изменениями от 16.12.2015 г. и ранее). 48 с. / Regulations for price bids submission by wholesale market participants. Appendix 5 to the Agreement on the accession to the wholesale market trading system (with amendments of 16 December 2015 and earlier). 48 p.

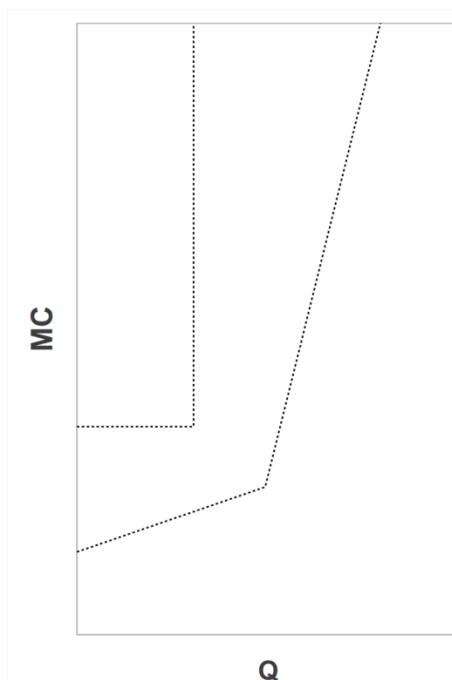


Рис. 1. Кривые предложения поставщиков по Стофту

Fig. 1. Stoft supply curves

Одной из важнейших, оказавших существенное влияние на структуру и регулирование современных рынков в электроэнергетике является публикация [3]. Здесь авторы определяют предельные издержки как производную от полных издержек на электроснабжение потребителей по объему потребления, считая функцию полных издержек дифференцируемой. Далее авторы поясняют, что поскольку генерация предполагается оптимально диспетчируемой, предельные издержки превышают средние эксплуатационные издержки. В численных примерах эксплуатационные издержки заданы в центах за киловатт-час независимо от загрузки блока (т.е. неубывающими). Ограничения на технический минимум станций и блоков не рассматриваются. Однако в разделе 4.5, посвященном вычислению часовых спотовых цен, авторы признают, что в действительности с учетом характеристик расхода тепла график зависимости затрат от нагрузки часто не будет непрерывно дифференцируемой или даже монотонной функцией. Но далее эта тема не развивается.

В [4] для определения предельных издержек используются данные GEGB

Statistical Yearbook, содержащего информацию о коэффициенте полезного действия (КПД) энергетического оборудования угольных и мазутных электростанций. Полученная в результате ступенчатая характеристика не имеет указаний на технические минимумы и убывающие участки. Авторами получена функция удельно-предельного характера, где предельный подход обозначен расчетом по отдельным электростанциям, последовательно вводимым в работу по мере роста нагрузки, а удельный – усредненным расчетом топливных издержек в пределах одной станции. Такой подход принципиально отличается, например, от подхода в [3], где предельными издержками называется частная производная полных издержек одной станции по нагрузке. Соответственно, предельные издержки, вычисленные этими двумя способами, будут отличаться.

В [5] приводятся вычисленные характеристики краткосрочных предельных издержек электростанций, которые имеют монотонно возрастающий характер. Однако в силу того, что ни сам алгоритм, ни модели вычисления этих характеристик, ни исходные данные в статье не приводятся,



воспроизведение и анализ результатов вычислений невозможны.

В вышедшей почти полвека назад работе [6] уже используется критерий равенства цен предельным эксплуатационным издержкам. Уже тогда отмечалось, что функция издержек может быть прерывистой. Автор утверждает, что предельные издержки системы являются горизонтальной суммой кривых издержек составляющих систему станций, отличающихся по возрасту, местоположению и типу. Из этого автор делает вывод, что кривая издержек имеет возрастающий характер. Получение кривой предельных издержек отдельной электростанции, как и ограничения на технический минимум, не рассматриваются.

В [7] указано, что общесистемная кривая предельных издержек имеет возрастающий характер, так как электростанции используются в порядке убывания КПД. При этом электростанции заданы эксплуатационными издержками в долларах на киловатт за единицу времени без учета зависимости этой величины от степени загрузки станции. Технические и технологические минимумы станций в модели не оговариваются.

Концепция равновесия функций предложения, используемая для моделирования рынков электроэнергии [8], основана на предположении о том, что функции затрат поставщиков дважды дифференцируемы на всем диапазоне положительных значений выпуска, и первая и вторая производные по объему на всем диапазоне больше нуля. Это автоматически исключает убывающие предельные издержки из допустимых условий применения равновесия функции предложения.

В [9] издержки определены следующим образом: «Пусть функция издержек на производство электроэнергии поставщика в узле i представлена квадратичной зависимостью». При этом, хотя сам процесс получения и обоснования данной зависимости в статье не рассматривается, отклонения заявок от заданной авторами характеристики называется «манипулированием» и при-

быль поставщика рассчитывается по отношению к заданной расходной характеристике. Задаваемая зависимость, разумеется, имеет неубывающий характер.

В [10] топливные издержки электростанций определяются как набор постоянных удельных издержек, не зависящих от загрузки электростанции.

Некоторые источники допускают, что характеристики предельных издержек могут иметь убывающий характер, однако далее эта мысль не развивается. Так, автор работы [11] упоминает о том, что снижающиеся издержки могут быть проблемой для ценообразования, но для своих исследований задает предельные издержки постоянными, как и удельные условно-постоянные издержки. В [12] отмечено, что простейший случай оптимального распределения нагрузки между электростанциями справедлив для ситуации, когда характеристики относительных приростов расхода топлива не имеют падающих участков. В [13] утверждается, что для существования решения для электроэнергетических рынков в условиях совершенной конкуренции необходимо, чтобы кривые спроса имели непрерывный и убывающий характер, а функции затрат генерирующих компаний были строго выпуклыми.

Обзор литературы можно продолжать, однако, из рассмотренных ключевых источников видно следующее:

- авторы, как правило, сходятся во мнении относительно свойств функций предложения в условиях совершенной конкуренции: определена на всем диапазоне, непрерывная или ступенчатая, неубывающая, независима от результатов работы рынка, совпадает с предельными издержками. В случае если автор допускает отсутствие одного из свойств, анализ в этом направлении не продолжается;

- под предельными издержками разные авторы понимают разные величины. В явном виде алгоритмы и модели получения предельных издержек из доступных исходных данных реальных электростанций или блоков обычно не приводятся.

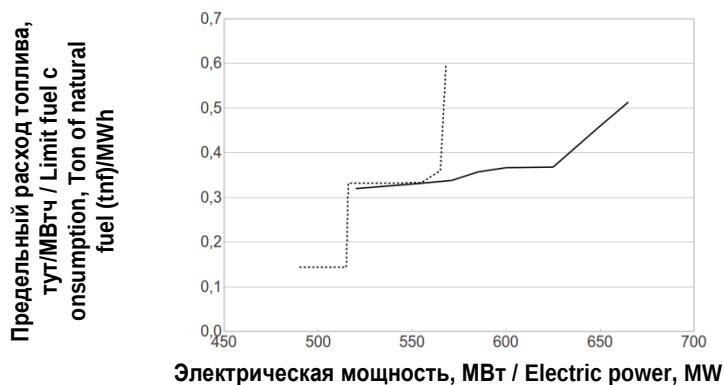


Рис. 2. Расчетные характеристики краткосрочных предельных издержек ТЭЦ для конденсационной выработки
Fig. 2. Calculation characteristics of CHP short-term marginal costs for condensate production

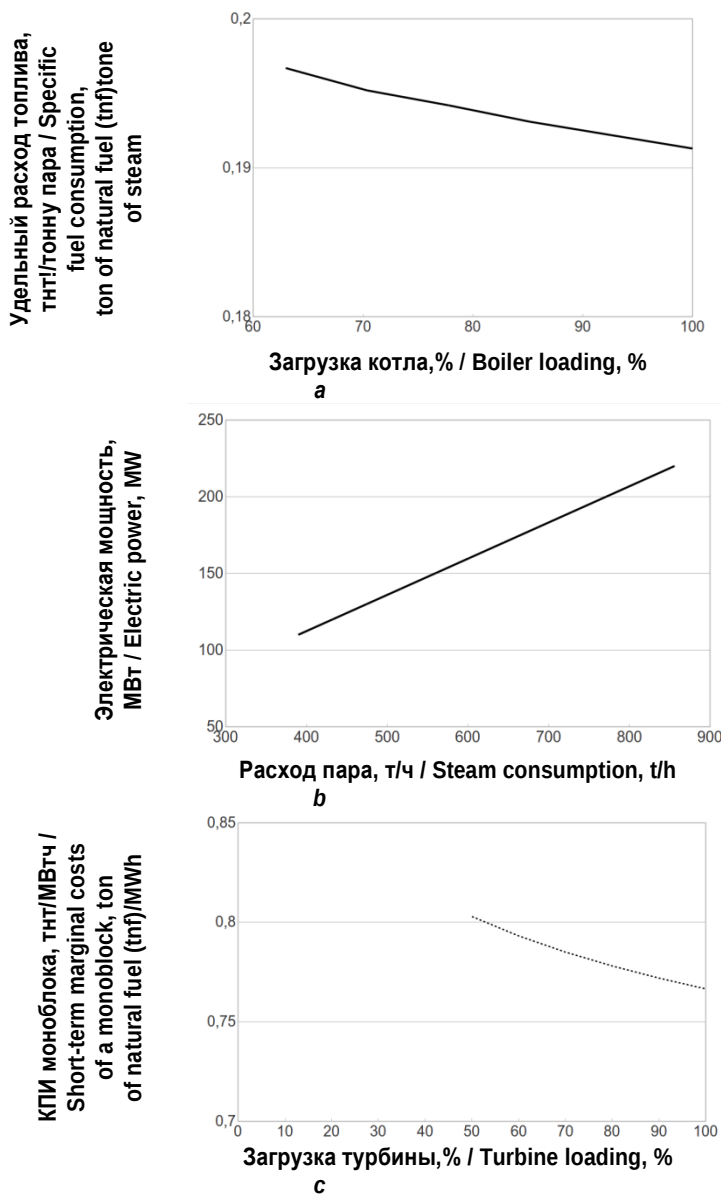


Рис. 3. Характеристика котла (а) и турбины Т-185/220-130, работающей в конденсационном режиме (б); краткосрочные предельные издержки моноблока с турбиной (с)
Fig. 3. Characteristics of the boiler (a) and turbine Т-185 / 220-130 operating in the condensation mode (b); short-term marginal costs of a monoblock with a turbine (c)



Исключением являются работы [14–16], авторы которых отталкиваются от технической стороны вопроса. Акцент они делают на моделировании работы теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) и вычислении затрат для оптимального режима при заданных технических ограничениях. Связь между издержками и заявками рассматривается в [17] и [18]. В диссертационной работе А.В.

Чалбышева³ приводятся расчетные характеристики предельных издержек для двух режимов ТЭЦ (рис. 2). Однако расчет здесь выполнен с достаточно крупным шагом, возможно, не позволяющим выявить участки снижающихся предельных издержек. Обсуждаемые свойства функций предложения ТЭЦ в этих работах не проверяются.

Краткосрочные предельные издержки

В рамках настоящей работы ограничимся анализом издержек, связанных с решением увеличить или уменьшить текущую мощность уже построенной и функционирующей станции на единицу. При таком подходе остальные издержки, включая капиталовложения, зарплату персонала, налоги и пр., считаются невозвратными и не рассматриваются. То есть рассматриваются только издержки, изменяющиеся при изменении текущей мощности, в основном это затраты на топливо. Этот подход соответствует пониманию предельных издержек в [3] и применим для краткосрочных рынков – рынка на сутки вперед и балансирующего рынка. Предельные издержки, соответствующие этому решению, будем называть краткосрочными предельными издержками (КПИ) в отличие от предельных издержек, получаемых с помощью других подходов (добавить в баланс электростанцию, расширить электростанцию, построить новую электростанцию и т.д.).

Функция КПИ блока и область ее определения. Для большинства котлов, эксплуатируемых в России, технический минимум составляет 40–60% от номинальной мощности⁴.

Технический минимум обусловлен причинами технического характера: устойчивостью горения факела в котле, допустимыми параметрами пара на выходе из турбины и т.д. Поскольку энергоблок не может вырабатывать мощность ниже технического минимума, для моноблока «котел – турбина – генератор» область определения функции КПИ начинается в районе 40–60% от номинальной мощности блока и заканчивается величиной рабочей мощности (допустимые перегрузки не рассматриваем).

КПД парового котла снижается при снижении нагрузки относительно номинальной (см. [19], гл. 7, рис. 7.2). Аналогично может выглядеть КПД паровой турбины (на примере турбины К-800-23,5-3; см. рис. 3.42, а в справочнике под ред. А.В. Клименко и В.М. Зорина⁵). Если в паре котел – турбина положительная корреляция КПД и нагрузки наблюдается у обоих агрегатов, то каждый последующий мегаватт выдаваемой электрической мощности будет вызывать дополнительные топливные издержки ниже, чем предыдущий мегаватт. Следовательно, характеристика краткосрочных предельных издержек является убывающей.

³Чалбышев А.В. Оптимизация режимов работы ТЭЦ с учетом современных условий их функционирования в составе электроэнергетической системы: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01. Иркутск. 2015. 158 с. / Chalbyshev A.V. Optimization of CHP operating modes taking into account modern conditions of their operation as parts of the electric power system: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.14.01. Irkutsk. 2015, 158 p.

⁴РД 34.25.503-2003. Нормы минимальных допустимых нагрузок энергоблоков 150–1200 МВт / RD 34.25.503-2003. Norms of the minimum permissible loads of 150-1200 MW power units.

⁵Тепловые и атомные электростанции: справочник / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. 3-е изд., перераб. и доп. Кн. 3. Теплоэнергетика и теплотехника. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 648 с. / Thermal and nuclear power plants: Reference book / under general editorship of A.V. Klimenko, V.M. Zorin. 3rd edition, enlarged and revised. Book. 3. Heat power engineering and combustion engineering. Moscow: MEI Publ., 2003, 648 p.



Характеристика КПИ блока с турбиной Т-185/220-130, работающей в конденсационном режиме, приведена на рис. 3. Технический минимум принят равным 50%, максимум – 100% от номинальной мощности. Характеристика турбины Т-185/220-130 нелинейна, ее КПД возрастает при росте нагрузки.

Для дубль-блоков (два котла – турбина – генератор) рабочий диапазон может быть шире и начинаться от 20–25% номинальной мощности за счет того, что котлы будут включаться в работу последовательно по мере роста нагрузки. Однако необходимость перераспределения нагрузки между котлами по мере роста мощности приводит к появлению разрыва характеристики КПИ дубль-блока в точке перехода от одного полностью загруженного котла к двум полузагруженным. Пример такой характеристики приведен на рис. 4.

Заметим, что ни характеристика моноблока, ни характеристика дубль-блока не имеют смысла (не определены) для значений нагрузки ниже технического минимума и в рассмотренном случае не являются монотонно-возрастающими или даже просто неубывающими на всем диапазоне допустимых значений.

КПИ моноблока не зависит от принятой на рынке на сутки вперед мощности

по часам и установленной цены. Однако уже для дубль-блока КПИ зависят от задаваемого на сутки вперед режима. Это связано с тем, что переход через точку 50% загрузки турбины связан с дополнительными издержками на растопку второго котла. По сути, издержки на растопку вызваны необходимостью обеспечить выдачу определенной электрической мощности в течение нескольких часов и, следовательно, относятся к краткосрочным предельным издержкам.

Соответственно, однозначной функции краткосрочных предельных издержек дубль-блока, справедливой для всего диапазона его доступной мощности, не существует. Такую функцию можно построить либо для диапазона от 25 до 50% мощности, либо от 50 до 100% мощности, либо для диапазона 25–100% мощности при условии перехода через точку 50% только при снижении мощности. В первом случае дубль-блок работает на одном котле, во втором – на двух, в третьем – сначала на двух, затем на одном. Общая функция КПИ, включающая в себя оба диапазона, может быть сформирована только в том случае, если заранее известно, сколько котлов работало в начале исследуемого временного интервала и требуется ли растопка второго котла, если он не использовался в начале.

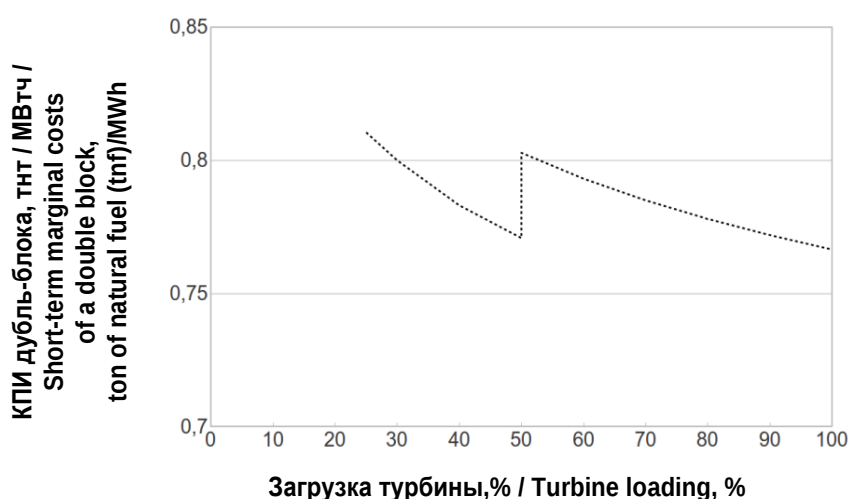


Рис. 4. Краткосрочные предельные издержки дубль-блока с турбиной Т-185/220-130, работающей в конденсационном режиме

Fig. 4. Short-term marginal costs of the double-block with the turbine Т-185/220-130, operating in a condensation mode



Если, например, для электростанции вычислена характеристика КПИ исходя из того, что в течение суток постоянно задействован либо один котел в дубль-блоке, либо два, а по результатам торгов на рынке на сутки вперед ей назначили режим с включением и выключением одного котла в течение суток, то первоначально вычисленная характеристика не будет соответствовать фактическим предельным издержкам, связанным с поддержанием станцией такого режима.

ТЭЦ отличается от конденсационной электростанции (КЭС) типами применяемых турбин и наличием поперечных паропроводов, связывающих отдельные агрегаты в единую систему. По этой причине построение характеристик КПИ для отдельных агрегатов ТЭЦ невозможно. Таким образом:

– функция краткосрочных предельных издержек рассмотренного моноблока является убывающей, дубль-блока – раз-

рывной, состоящей из двух убывающих участков;

– функция краткосрочных предельных издержек одного моноблока не зависит от того, какая его мощность будет принята на рынке, а одного дубль-блока – уже зависит.

КПИ электростанции. Возьмем для примера абстрактную тепловую электростанцию (ТЭС), имеющую четыре одинаковых моноблока, рассмотренных выше. Технический минимум каждого моноблока примем равным 60% от установленной мощности. Характеристику рассчитаем исходя из предположения неизменности состава включенного оборудования.

В силу того что блоки одинаковы, возможны четыре варианта состава работающего оборудования: включен один блок, два, три или четыре. Характеристики КПИ ТЭС для соответствующих случаев показаны на рис. 5.

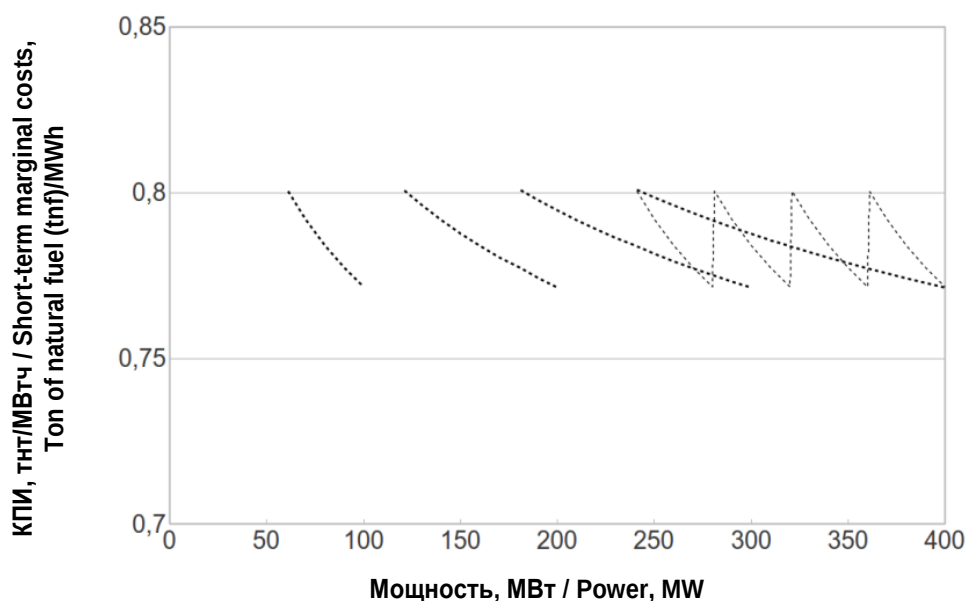


Рис. 5. Краткосрочные предельные издержки ТЭС с четырьмя одинаковыми моноблоками в зависимости от количества одновременно включенных блоков (для четырех включенных блоков показано две характеристики: монотонная – для параллельного набора нагрузки всеми блоками, пилообразная – для последовательного набора нагрузки)

Fig. 5 Short-term marginal costs of the CHP with four identical monoblocks depending on the number of simultaneously enabled blocks (two characteristics are shown for four enabled blocks: monotone – for a parallel load increase by all blocks, sawtooth – for a sequential load increase)



Для ТЭС, эксплуатирующей блоки, отличающиеся по номинальной мощности и КПИ, число вариантов возрастает в зависимости от того, какие блоки включены одновременно (2 разных блока – 3 характеристики, 3 разных блока – 7 характеристик, 4 разных блока – 15 характеристик и т.д.). Дополнительно у каждой характеристики КПИ для двух и более включенных блоков будут существовать вариации в зависимости от того, одновременно или последовательно блоки набирают нагрузку.

Формирование соответствующей издержкам характеристики предложения на краткосрочных рынках

Итак, к краткосрочным относим балансирующий рынок и рынок на сутки вперед. Для них решение принимается в формате «увеличить/снизить фактическую мощность электростанции». При этом:

а) к условно-постоянным издержкам поставщиков относятся все издержки, не изменяющиеся при увеличении фактической мощности ТЭС в пределах от минимума до рабочей мощности;

б) для последующего расчетного периода имеют значение составы оборудования, задействованные в предыдущем расчетном периоде.

В условиях совершенной конкуренции любой участник рынка считается ценополучателем, т.е. неспособным влиять на складывающуюся цену товара. Поведение такого поставщика и его функция предложения обусловлены критерием максимизации собственной выгоды. Функция предложения – в общем случае это множество пар точек в координатах объем–цена, где каждому заданному значению цены соответствует такое значение объема, при котором данный поставщик получает максимальную выгоду.

Если характеристика краткосрочных предельных издержек неубывающая, то функция выгоды при заданной цене (выгода определяется как выручка за данный товар/услугу за рассматриваемый отрезок времени минус сумма краткосрочных/топливных издержек за этот отрезок

Для ТЭЦ в целом возможно построение характеристики краткосрочных предельных издержек для выработки в конденсационном цикле. Такая характеристика будет зависеть от тепловой нагрузки, которая может меняться в течение суток. Характеристика КПИ, построенная для постоянной тепловой нагрузки ТЭЦ, может также зависеть от ожидаемых колебаний электрической мощности и соответствующих включений и выключений оборудования, переключений на ТЭЦ.

времени) такого поставщика имеет один экстремум. Такой поставщик естественным образом стремится к объемам производства, при которых каждая единица (киловатт мощности или киловатт-час электроэнергии) товара с КПИ меньше цены будет произведена, а каждая единица товара с КПИ больше цены не будет произведена (рис. 6). В этом случае функция предложения на краткосрочном рынке совершенной конкуренции будет совпадать с функцией КПИ. Именно этот случай наиболее удобен для рассмотрения и традиционно используется для описания поведения поставщиков.

Однако для убывающих функций КПИ или КПИ, имеющих убывающие участки, упрощенная логика о совпадении КПИ и функции предложения не работает. ХП ценополучателя должны вычисляться по полному алгоритму:

– Задать цену.

– Решить задачу оптимизации выгоды поставщика при заданной цене по объему производства (фактической мощности) суммарно по электростанции или по элементам с учетом возможностей внутренней оптимизации режима.

– Полученная пара цена–объем является одной точкой характеристики предложения.

– Повторить вычисления с п. 1 для других заданных цен.

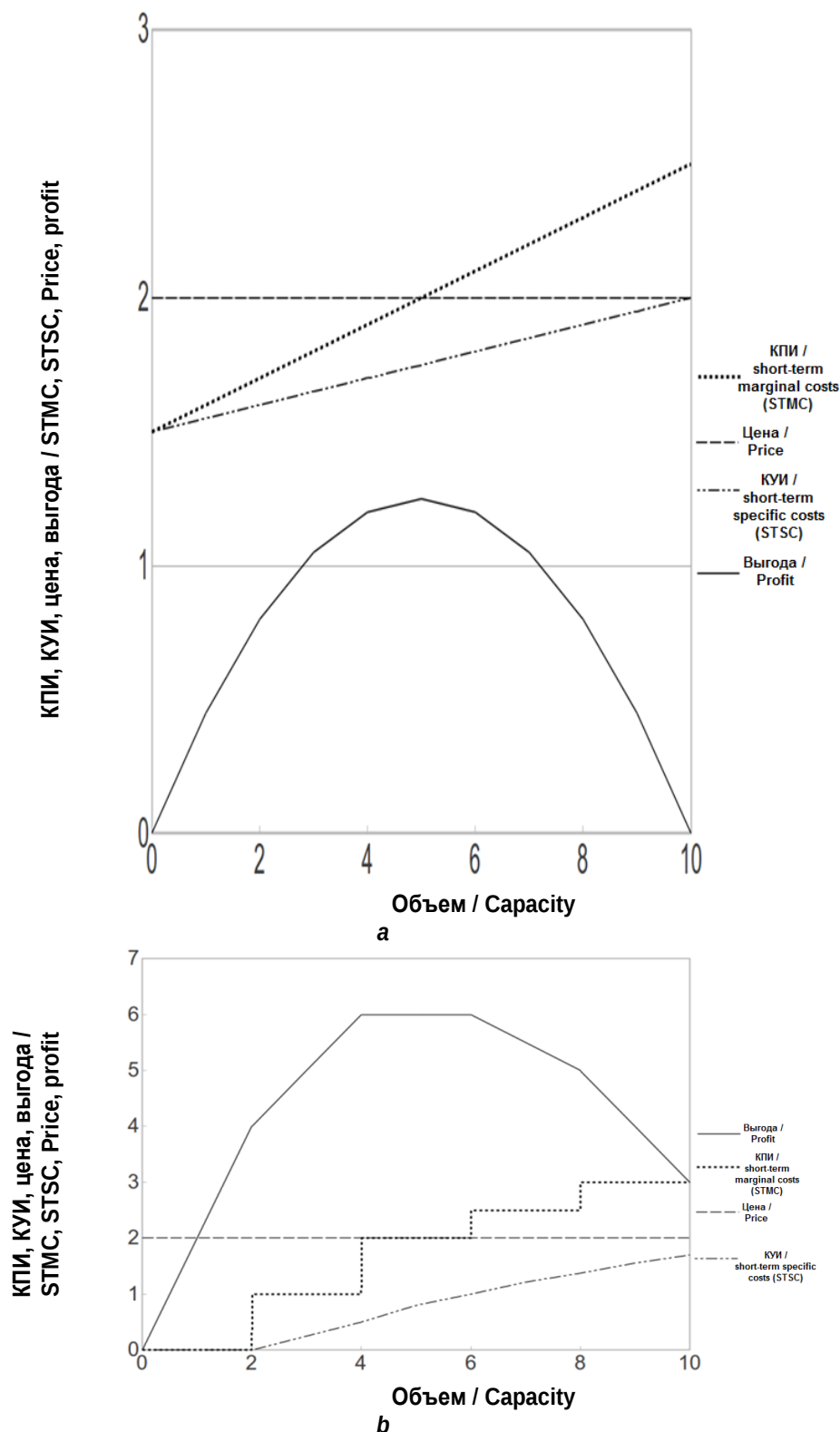


Рис. 6. Соотношение выгоды и КПИ в случае неубывающих КПИ для поставщиков-ценополучателей:
а – линейная характеристика КПИ; б – ступенчатая характеристика КПИ.

Максимум выгоды приходится на пересечение КПИ и цены. Функция КПИ и характеристика предложения совпадают, функция КУИ ниже функции КПИ

Fig. 6. The ratio of profit and short-term marginal costs (STMC) in the case of non-decreasing STMC for suppliers-price-recipients: a – linear characteristic of STMC; b – step characteristic of STMC.

The maximum profit is in the intersection of the STMC and the price. The STMC function and the characteristic of the offer coincide, the function of the short-term specific costs (STSC) is lower than the STMC function



Характеристика предложения, вычисленная по полному алгоритму, для абстрактного примера КПИ с убывающими участками показана на рис. 7. Заметим, что характеристика определена лишь в одной (рис. 7, а) или нескольких (рис. 7, б) точках. Такая форма обусловлена тем, что функ-

ция выгоды при некоторых значениях цены может иметь два экстремума. Тогда на убывающем участке КПИ наблюдается сокращение выгоды и, следовательно, область неопределенности функции предложения.

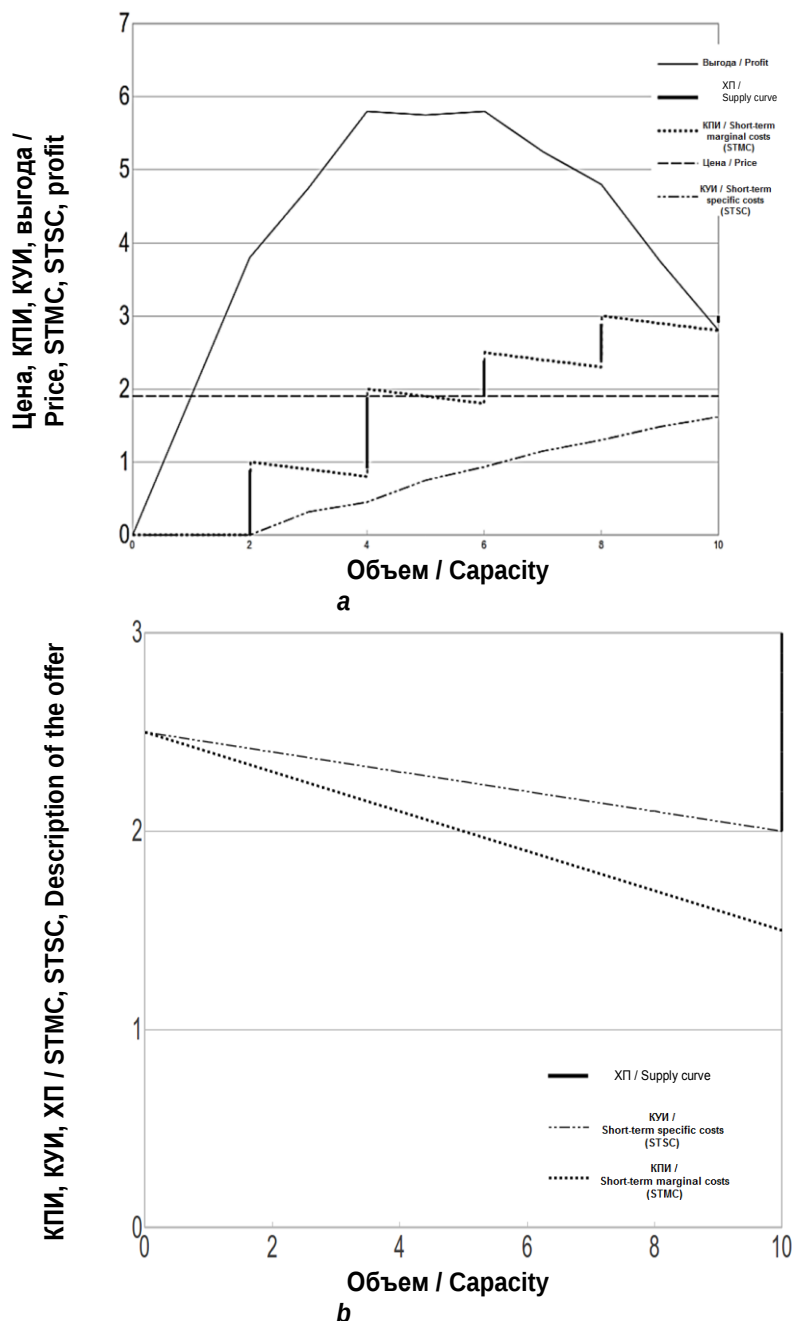


Рис. 7. Соотношение КПИ, КУИ и соответствующих им характеристик предложения для убывающих КПИ (КПИ с убывающими участками) для поставщиков-ценополучателей:

а – убывающая КПИ; б – КПИ с убывающими участками

Fig. 7. The ratio of short-term marginal costs, short-term specific costs and supply curves corresponding them for decreasing STMC (STMC with descending sections) for suppliers-price-takers:

а – decreasing STMC; б – STMC with descending sections



Для характеристик предложения, соответствующих убывающим характеристикам КПИ, необходимо принимать во внимание дополнительное ограничение на выручку: выручка от производства электроэнергии в любой точке ХП не может быть ниже краткосрочных издержек в этой точке. Другими словами, если точка максимума выгоды при заданной цене не обеспечивает компенсации топливных издержек в данном режиме, то эта точка исключается из множества допустимых значений характеристики предложения, поскольку выгода отрицательна и поставщик не заинтересован в работе в данной точке. Для неубывающих функций КПИ это ограничение выполняется автоматически и отдельно не

рассматривается. Для убывающих КПИ и КПИ с убывающими участками это ограничение выражается в том, что характеристика предложения не может быть ниже характеристики краткосрочных удельных издержек (КУИ), вычисляемой как отношение суммарных переменных (топливных) издержек к объему производства (электрической мощности) в данном режиме.

Характеристика предложения для рынка на сутки вперед, соответствующая КПИ на рис. 3, показана на рис. 8. Характеристика рассчитана для ТЭС-ценополучателя, эксплуатирующей один моноблок (рис. 8, а), и для ТЭС-ценополучателя, эксплуатирующей 4 одинаковых моноблока (рис. 8, б).

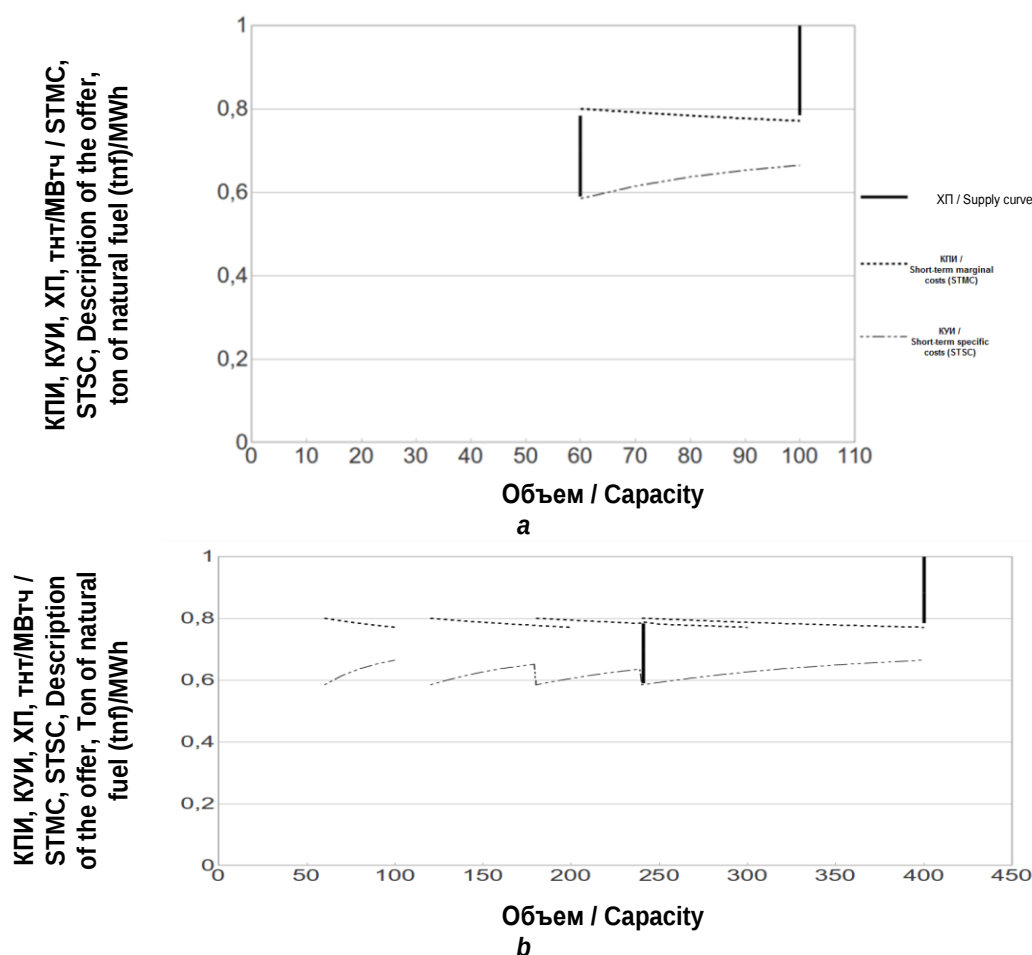


Рис. 8. КПИ, КУИ и соответствующая им характеристика предложения (в тнт/МВтч) КЭС-ценополучателя с убывающими КПИ моноблока с одним моноблоком (а), с четырьмя одинаковыми моноблоками (б)

Fig. 8. STMC, STSC and corresponding supply curve (in ton of natural fuel/MWh) of condensing power plant pricetaker with decreasing monoblock STMC with one monoblock (a), with four identical monoblocks (b)



Поскольку речь идет о краткосрочных рынках, где скорость перехода блока из одного режима в другой может иметь значение, реальная характеристика предложения, соответствующая КПИ, может быть ограничена темпами набора и сброса мощности. Для блоков с ограниченной маневренностью характеристика предложения, соответствующая КПИ и подаваемая на рынок на сутки вперед или балансирующий рынок, может отличаться от приведенных на рис. 8. Например, для станции, приведенной на рис. 8, *b*, если в час n станция работает с мощностью 240 МВт и она не может за час увеличить свою мощность до 400 МВт, то характеристика пред-

ложения для часа $n+1$ не будет содержать отрезка, соответствующего фактической мощности 400 МВт.

Формирование подобной характеристики предложения для ТЭС с разными блоками и ТЭЦ требует оптимизационных расчетов по вышеприведенному алгоритму. При этом на интервалах, где мощность станции увеличивается не за счет включения нового оборудования, а за счет загрузки уже работающих котлов и турбин, также возможно убывание функции КПИ вследствие роста КПД турбин и котлов с ростом нагрузки и, следовательно, область неопределенности функции предложения.

Выводы

Взаимосвязь между издержками поставщиков электроэнергии и их характеристиками предложения в условиях совершенной конкуренции исследована очень слабо. Существующие представления связаны в основном с неубывающими предельными издержками. Случай убывающих предельных издержек в экономике электроэнергетики не раскрыт.

В статье для конкретного примера убывающей характеристики краткосрочных предельных издержек получена характеристика предложения ТЭС для рынка на сутки вперед. Показано, что:

- функция краткосрочных предельных издержек может зависеть от результатов работы рынка, если в рассматриваемом временном интервале меняется состав включенного оборудования и это изменение влечет за собой дополнительные затраты;
- для диапазона мощностей ниже технического минимума характеристика предложения не имеет смысла (не определена);
- если характеристика краткосрочных предельных издержек убывающая или имеет убывающие участки, то она не сов-

падает с характеристикой предложения;

- на диапазонах мощности, соответствующих убывающим участкам характеристики краткосрочных предельных издержек, характеристика предложения поставщика ценополучателя не определена;

- в характеристике предложения, соответствующей характеристике краткосрочных предельных издержек со снижающимися участками, необходимо учитывать ограничения на краткосрочные удельные издержки;

- для ТЭС, эксплуатирующей несколько одинаковых блоков, характеристика предложения ценополучателя может начинаться не от технического/технологического минимума станции в целом, а в районе более высоких нагрузок (в рассмотренном случае – в точке технического минимума четырех включенных блоков). При этом число участков характеристики не совпадает с числом располагаемых ТЭС энергоблоков.

Вычисления произведены для условий совершенной конкуренции и выводы не имеют отношения к манипулированию рынком и использованию монопольной власти.



Библиографический список

1. Стофт С. Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии; пер. с англ. М.: Мир, 2006. 623 с.
2. Kirschen D.S., Strbac G. Fundamentals of Power Systems Economics. John Wiley & Sons, Ltd. 2004. 284 p.
3. Schweppe F.C., Caramanis M.C., Tabors R.D., Bohn, R.E. Spot Pricing of Electricity. Kluwer academic publishers. 1988. 356 p.
4. Green R.J., Newberry D.M. Competition in the British Electricity Spot Market // The Journal of Political Economy. 1992. Vol. 100. No. 5. P. 929–953.
5. Joskow P.L., Kahn E. A Quantitative Analysis of Pricing Behavior in California's Wholesale Electricity Market during Summer 2000 // The Energy Journal. 2002. Vol. 23. No 4. P. 1–35.
6. Turvey R. Peak-Load Pricing // Journal of Political Economy. 1968. Vol. 76. P. 101–113.
7. Crew M.A., Kleindorfer P.R. Peak Load Pricing with a Diverse Technology // The Bell Journal of Economics. 1976. Vol. 7. No. 1. P. 207–231.
8. Klemperer P.D., Meyer M.A. Supply Function Equilibria in Oligopoly under Uncertainty // Econometrica. 1989. Vol. 57. No. 6. P. 1243–1277.
9. Нечаев И.В., Паламарчук С.И. Планирование загрузки электростанций в условиях оптового рынка электроэнергии // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 6. С. 71–83.
10. Подковальников С.В., Хамисов О.В. Несовершенные электроэнергетические рынки: моделирование и исследование развития генерирующих мощностей // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 2. С. 57–76.
11. Steiner P.O. Peak loads and efficient pricing // Quarterly Journal of Economics. 1957. Vol. 71. Issue 4. P. 585–610.
12. Урин В.Д., Кутлер П.П. Энергетические характеристики для оптимизации режима электростанций и энергосистем. М.: Энергия. 1974. 136 с.
13. Gabriel S.A., Conejo A.J., Fuller J.D., Hobbs, B.F., Ruiz C. Complementarity Modeling in Energy Markets. International Series on Operations Research & Management Science. Springer, New York, 2013. 630 p.
14. Клер А.М., Максимов А.С., Чалбышев А.В. Оптимизация режимов работы энергоисточников на органическом топливе с учетом конъюнктуры оптового рынка электроэнергии // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. № 1. С. 73–79.
15. Клер А.М., Максимов А.С., Чалбышев А.В., Степанова Е.Л. Оптимизация режимов работы ТЭЦ для максимизации прибыли в условиях балансирующего рынка электроэнергии // Известия РАН. Энергетика. 2014. № 2. С. 71–80.
16. Клер А.М., Максимов А.С., Чалбышев А.В., Степанова Е.Л. Выбор оптимальных состава работающего оборудования и режима работы ТЭЦ на рынке на сутки вперед // Известия РАН. Энергетика. 2015. № 4. С. 116–129.
17. Клер А.М., Максимов А.С., Чалбышев А.В., Степанова Е.Л. Оптимальное распределение нагрузок между агрегатами теплоэлектроцентралей при работе на рынке на сутки вперед // Вестник науки Сибири. 2015. Спецвыпуск (15). С. 63–67.
18. Клер А.М., Максимов А.С., Степанова Е.Л., Чалбышев А.В. Задачи внутренней оптимизации режимов функционирования ТЭЦ при работе на рынке на сутки вперед // Энергетик. 2015. № 8. С. 20–23.
19. Липов Ю.М., Третьяков Ю.М. Котельные установки и парогенераторы. Москва-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2003. 592 с.

References

1. Stoft S. *Ekonomika energosistem. Vvedenie v proektirovanie rynkov elektroenergii* [Economics of energy systems. Introduction to electricity markets design]. Moscow: Mir Publ., 2006, 623 p.
2. Kirschen D.S., Strbac G. Fundamentals of Power Systems Economics. John Wiley & Sons, Ltd. 2004, 284 p.
3. Schweppe F.C., Caramanis M.C., Tabors R.D., Bohn, R.E. Spot Pricing of Electricity. Kluwer academic publishers. 1988, 356 p.
4. Green R.J., Newberry D.M. Competition in the British Electricity Spot Market. The Journal of Political Economy. 1992, vol. 100, no. 5, pp. 929–953.
5. Joskow P.L., Kahn E. A Quantitative Analysis of Pricing Behavior in California's Wholesale Electricity Market during Summer 2000. The Energy Journal. 2002, vol. 23, no 4, pp. 1–35.
6. Turvey R. Peak-Load Pricing. Journal of Political Economy. 1968, vol. 76, pp. 101–113.
7. Crew M.A., Kleindorfer P.R. Peak Load Pricing with a Diverse Technology. The Bell Journal of Economics. 1976, vol. 7, no. 1, pp. 207–231.
8. Klemperer P.D., Meyer M.A. Supply Function Equilibria in Oligopoly under Uncertainty. Econometrica. 1989, vol. 57, no. 6, pp. 1243–1277.
9. Nechaev I.V., Palamarchuk S.I. Power plant generation scheduling in the wholesale electricity market environment. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 2011, no 6, pp. 71–83. (In Russian).
10. Podkova'nikov S.V., Khamisov O.V. Imperfect power markets: modeling and study of generating capacity expansion. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 2011, no. 2, pp. 57–76. (In Russian).
11. Steiner P.O. Peak loads and efficient pricing. Quarterly Journal of Economics. 1957, vol. 71, issue 4, pp. 585–610.



12. Urin V.D., Kutler P.P. *Energeticheskie kharakteristiki dlya optimizatsii rezhima elektrostantsii i energosistem* [Energy characteristics for power plants and power systems mode optimization]. Moscow: Energiya Publ., 1974, 136 p. (In Russian).
13. Gabriel S.A., Conejo A.J., Fuller J.D., Hobbs, B.F., Ruiz C. Complementarity Modeling in Energy Markets. International Series on Operations Research & Management Science. Springer, New York, 2013, 630 p.
14. Kler A.M., Maksimov A.S., Chalbyshev A.V. Optimizing the operating modes of cogeneration stations taking conjuncture of wholesale electricity market into account. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Voronezh State University]. 2013. № 1. С. 73–79. (In Russian).
15. Kler A.M., Maksimov A.S., Chalbyshev A.V., Stepanova E.L. Optimization of cogeneration plant operation for maximization of profit in balancing electricity market. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 2014, no. 2, pp. 71–80. (In Russian).

Критерии авторства

Васильев М.Ю. провел исследование, подготовил материалы к публикации и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Васильев М.Ю. заявляет об отсутствии конфликта интересов.

16. Kler A.M., Maksimov A.S., Chalbyshev A.V., Stepanova E.L. Optimal operation units choice and operation mode of cogeneration plants on Russian day-ahead electricity market. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 2015, no. 4, pp. 116–129. (In Russian).
17. Kler A.M., Maksimov A.S., Chalbyshev A.V., Stepanova E.L. Optimal day-ahead distribution of loads between heat and power plant aggregates under market operation // *Vestnik nauki Sibiri. [Bulletin of Siberian Science]*. 2015, Special issue (15), pp. 63–67. (In Russian).
18. Kler A.M., Maksimov A.S., Stepanova E.L., Chalbyshev A.V. Problems of internal optimization of CHP modes when operating on the day-ahead market. *Energetik* [Power and Electric Engineering]. 2015, no. 8, pp. 20–23. (In Russian).
19. Lipov Yu.M., Tret'yakov Yu.M. *Kotel'nye ustanovki i parogeneratory* [Boiler installations and steam generators]. Moscow-Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika", 2003, 592 p. (In Russian).

Authorship criteria

Vasiliev M.Yu. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

Vasiliev M.Yu. declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 66.074.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-138-144>

УЛАВЛИВАНИЕ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ИЗ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ СЕПАРАТОРАХ

© А.В. Дмитриев¹, В.Э. Зинуров², О.С. Дмитриева³, Ву Л. Нгуен⁴

^{1,2,4}Казанский государственный энергетический университет,
420066, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Красносельская, 51.

³Казанский национальный исследовательский технологический университет,
420015, Российская Федерация, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Рассмотреть возможность эффективной очистки газов от твердых частиц малого диаметра (1–10 мкм) путем осаждения мелкодисперсных частиц на двутавровых балках прямоугольного сепаратора, конструкция которого разработана авторами статьи. Исследовать влияние различных начальных скоростей газового потока на процесс осаждения частиц при их контакте с сепарационными колоннами. **МЕТОДЫ.** Исследование по улавливанию мелкодисперсных частиц диаметром менее 10 мкм было выполнено в программном комплексе ANSYS Fluent. Численное моделирование осуществлялось решением дифференциальных уравнений движения и неразрывности. Для замыкания системы уравнений использовалась модель турбулентности SST. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Представлены результаты компьютерного моделирования и анализ влияния скорости потока газа и диаметра твердых частиц на эффективность работы сепаратора. Установлено, что максимальная эффективность сепаратора достигается при нагнетании скоростей газового потока менее 3 м/с. **ВЫВОДЫ.** Применение прямоугольного сепаратора обеспечивает увеличение удельной площади поверхности контакта фаз с одновременным уменьшением гидравлического сопротивления газовому потоку.

Ключевые слова: циклон, осаждение частиц, улавливание твердых частиц, газификация твердого топлива.

Информация о статье. Дата поступления 24 января 2018 г.; дата принятия к печати 13 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Ву Л. Нгуен. Улавливание мелкодисперсных твердых частиц из газовых потоков в прямоугольных сепараторах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 138–144. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-138-144

TRAPPING OF FINELY-DIVIDED SOLID PARTICLES FROM GAS FLOWS IN RECTANGULAR SEPARATORS

A.V. Dmitriev, V.E. Zinurov, O.S. Dmitrieva, Vu L. Nguyen

Kazan State Power Engineering University,
51, Krasnoselskaya St., Kazan, 420066, Republic of Tatarstan, Russian Federation
Kazan National Research Technological University,
68, Karl Marks St., Kazan, 420015, Republic of Tatarstan, Russian Federation

¹Дмитриев Андрей Владимирович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ теплотехники, e-mail: ieremiada@gmail.com

Andrei V. Dmitriev, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Heat Engineering, e-mail: ieremiada@gmail.com

²Зинуров Вадим Эдуардович, магистрант, e-mail: vadd_93@mail.ru

Vadim E. Zinurov, Master's degree student, e-mail: vadd_93@mail.ru

³Дмитриева Оксана Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры оборудования пищевых производств, e-mail: ja_deva@mail.ru

Oksana S. Dmitrieva, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Food Production Equipment, e-mail: ja_deva@mail.ru

⁴Нгуен Ву Линь, аспирант, e-mail: vulinhbk@gmail.com

Nguyen Vu Linh, Postgraduate student, e-mail: vulinhbk@gmail.com



ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to consider the possibility of efficient purification of gases from small diameter solids (1–10 microns) by finely-divided particles precipitation on the H-beams of a rectangular separator designed by the authors as well as to study the effect of different initial velocities of the gas flow on particle deposition when they are in contact with separation columns. **METHODS.** ANSYS Fluent software package has been used to study the trapping of finely-divided particles whose diameter is less than 10 μm . Numerical simulation has been carried out through solving differential equations of motion and continuity. The turbulence model-SST has been used to close the system of equations. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The results of computer simulation and the analysis of the influence of gas flow velocity and solid particle diameter on separator efficiency are presented. The maximum efficiency of the separator is achieved when the gas flow rates are injected below 3 m/sec. **CONCLUSIONS.** The use of a rectangular separator increases the specific area of the contact surface of phases and simultaneously decreases the hydraulic resistance to the gas flow.

Keywords: cyclone, particle precipitation, particulate trapping, gasification of solid fuel

Information about the article. Received January 24, 2018; accepted for publication February 13, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S., Vu L. Nguyen. Trapping of finely-divided solid particles from gas flows in rectangular separators. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 138–144. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-138-144

Введение

Интенсивное развитие нефтехимических, энергетических и металлургических предприятий требует выпуска высокоэффективных пылеулавливающих аппаратов. Рост производства является причиной ухудшения экологической обстановки внутри предприятия и за его пределами: увеличение выбросов парниковых газов и твердых несгоревших частиц в атмосферу угрожает здоровью людей и наносит вред окружающей среде. Нарушение санитарных норм и правил влечет за собой санкции и большие штрафы для предприятий. Для снижения выбросов вредных веществ в атмосферу проводится большое количество достаточно эффективных мероприятий: применение присадок, улучшающих сгорание топлива в камере сгорания; использование пылеуловителей, фильтров и другие. Однако очистка газа от твердых частиц малого диаметра в нем остается актуальной задачей [1, 2].

Основными аппаратами для очистки воздуха от взвешенных в нем твердых частиц являются инерционные пылеуловители. Из всех имеющихся инерционных аппаратов наибольшее распространение получили циклоны, характеризующиеся относительно высокой степенью очистки, низкой стоимостью, простотой устройства и эксплуатации, надежной работой при температуре до 500°C. К основным недостаткам

циклонов относится высокое гидравлическое сопротивление, достигающее 1250–1500 Па, и низкая эффективность при очистке газа от частиц малого диаметра (до 10 мкм). В некоторых случаях для уменьшения гидравлического сопротивления применяют специальные устройства, например, раскручиватели, которые устраняют вращательное движение на выходе из циклонов. Однако практический опыт показывает, что раскручиватели снижают эффективность циклонов при улавливании мелкодисперсной пыли [3–7].

Поскольку циклоны успешно используются для очистки газов от частиц преимущественно диаметром более 10 мкм, то возникает необходимость в использовании дополнительных очистительных аппаратов. Это особенно актуально при работе на производстве с опасными, токсичными веществами: ванадий, асбест, свинец и др. Целью данной работы является исследование улавливания мелкодисперсных твердых частиц размером до 10 мкм, для чего авторами настоящей статьи предлагается использовать разработанный прямоугольный сепаратор. Его можно рассматривать как альтернативу циклонам вследствие высокой очистки газов (на 99,8–100%) от мелкодисперсной пыли диаметром в диапазоне от 10 до 300 мкм [8, 9].

Очистка газов прямоугольным сепарационным аппаратом

Устройство сепаратора. Разработанный авторами сепаратор состоит из нескольких рядов двутавровых балок, собранных в прямоугольный корпус размером $a \times c \times h$ (упрощенная модель аппарата представлена на рис. 1). С целью обеспечения минимального прогиба двутавровые балки удерживаются между собой двумя поперечными пластинами, которые фиксируются по высоте и крепятся к корпусу аппарата. Каждая балка имеет 9 дополнительных выступов со стороны контакта с газом. Максимальную длину имеет центральный выступ, длина каждого последующего выступа по направлению к периферии балки уменьшается на 45% от предыдущего. Данное оформление двутавровой балки со стороны обтекания газом позволяет снизить гидравлическое сопротивление аппарата и повысить эффективность улавливания мелкодисперсной пыли по сравнению с аппаратом, не имеющим выступов на двутавровых балках. Принцип работы устройства заключается в том, что при движении многофазного потока между элементами устройства возникает центробежная сила,

которая отбрасывает частицы пыли к балкам, заставляя их выпасть из потока. Часть газового потока движется перпендикулярно балкам, огибая их и теряя при этом часть энергии. Благодаря непосредственному контакту с балками большая часть взвешенных частиц в газе выбивается из потока и под собственной силой тяжести оседает на нижней поверхности аппарата. Наличие нескольких рядов двутавровых балок повышает эффективность очищения газового потока от полидисперсных частиц за счет более структурированного газового потока.

Устройство может работать периодически или непрерывно. В случае периодической работы частицы накапливаются в пространстве между выступами. Если же необходима непрерывная работа, то в нижней части устройства изготавливаются отверстия и частицы отводятся через них в емкость. Для увеличения эффективности улавливания возможна подача жидкости на элементы устройства. В последнем случае образующуюся суспензию можно перемещать насосами.

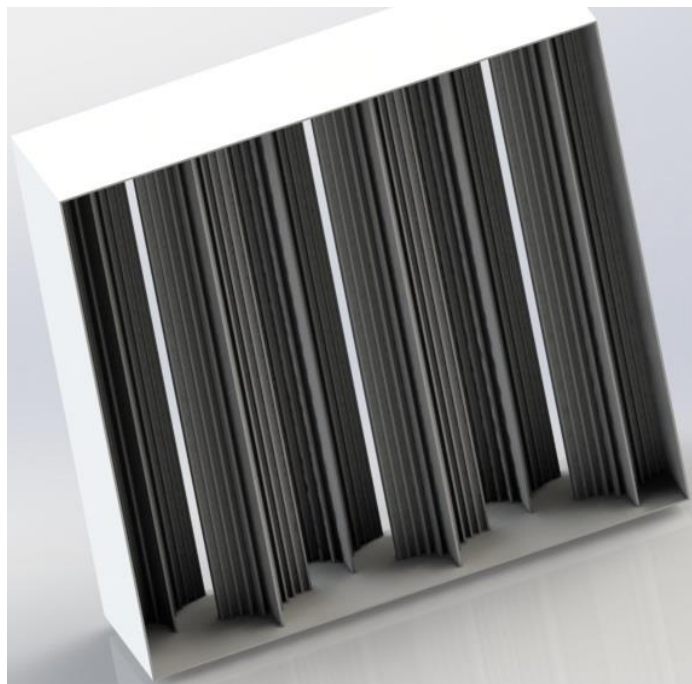


Рис. 1. Трехмерная модель прямоугольного сепаратора
Fig. 1. Three-dimensional model of a rectangular separator



Методы исследования. Поскольку основная часть мелкодисперсных частиц (до 90%) оседает на первых двух рядах колонн [8], то для упрощения расчета исследования проводились для сепаратора, состоящего из двух рядов стальных балок длиной 120 мм, а корпус данного аппарата имел следующие геометрические размеры, мм: $a = 120$; $c = 30$; $h = 120$.

Для расчета процесса улавливания мелкодисперсных частиц размером до 10 мкм использовался метод конечных элементов, расчеты проводились в программном комплексе ANSYS Fluent. В ходе исследования использовалась модель турбулентности SST.

Газ, состоящий из воздуха и мелкодисперсных твердых частиц, эмитируя в прямоугольный сепаратор, попадал на двутавровые балки, что приводило к осаждению на них мелкодисперсных частиц за счет процессов, описанных выше. Диаметр частиц продуктов сгорания d изменялся от 1 до 10 мкм, скорость газа w на входе в прямоугольный сепаратор варьировалась

от 0,5 до 5 м/с. Параметры окружающей среды на выходе из прямоугольного сепаратора были заданы нормальными: атмосферное давление – 101325 Па, температура воздуха – 273,15 К. Также постоянными оставались следующие параметры: начальная скорость частиц – 0 м/с, число n находящихся в газе частиц принималось равным 1000, массовый расход продуктов сгорания $G = 50$ г/с (0,05 кг/с). В ходе исследований на каждой поверхности двух рядов балок было определено количество осевших из газового потока частиц n . Эффективность улавливания мелкодисперсных частиц на двух рядах балок E прямоугольного сепаратора была определена по формуле

$$E = \frac{n - n_k}{n},$$

где n_k – число частиц, осевших на двух рядах балок.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные численные исследования показали, что использование прямоугольного сепаратора для улавливания мелкодисперсных частиц диаметром 1–10 мкм позволяет очистить газовый поток в среднем на 70,7% при нагнетании вентилятором скорости газа от 0,5 до 5 м/с. Как видно из представленной формулы, наибольшая эффективность сепаратора соответствует значениям E , стремящимся к нулю. Поэтому те линии, которые расположены ближе к оси абсцисс, соответствуют максимальному улавливанию из газа твердых частиц малого диаметра. Графически результаты исследований представлены на рис. 2–4.

Наибольший эффект очистки газа от мелкодисперсной пыли сепарационными колоннами (балками) достигается при нагнетании скорости газового потока вентилятором в диапазоне 0,5–1 м/с (рис. 2). При заданных значениях скорости потока

улавливается около 75% частиц диаметром 1–10 мкм. Линии 1 и 2 на рис. 2, характеризующие скорости газового потока 0,5 и 1 м/с соответственно, практически идентичны друг другу, кроме первой точки для диаметра частиц 1 мкм, которая указывает на то, что нагнетание вентилятором относительно низких скоростей газового потока (менее 1 м/с) снижает эффективность улавливания сепаратором мелкодисперсных частиц диаметром до 3 мкм. Для частиц с $d \geq 3$ мкм различие эффективности их улавливания сепарационными колоннами составляет около 0,01–0,09% при разных скоростях газового потока – от 0,5 до 1 м/с. Нагнетание вентилятором скоростей газового потока $w \geq 2$ м/с заметно снижает эффективность улавливания твердых частиц диаметром 1–10 мкм, чем при $w = 0,5$ –1 м/с. В справочной литературе [10] рекомендуется, чтобы скорость газового потока была не более 3 м/с, что подтверждается



графиком, приведенным на рис. 2: при скорости газового потока 2 м/с улавливается около 70,7% частиц, но при увеличении скорости газа до 5 м/с происходит снижение очистки газа в среднем на 10%.

По мере движения газового потока в сепараторе за двутавровыми балками образовывались застойные области, в которых наблюдалось завихрение потока, что в целом повышало гидравлическое сопротивление аппарата, но в то же время в данных завихрениях происходило очищение газа от мелкодисперсных частиц: частицы под собственной силой тяжести опускались на дно аппарата (рис. 3). Среднерасходная скорость газового потока увеличивалась до 2,5 м/с при начальной скорости, равной 0,5 м/с. Увеличение скорости газа вызвано поворотами при обтекании газом сепарационных колонн и застойными зонами. Исследования показали, что в среднем скорость газового потока увеличивается в 5 раз по отношению к начальной скорости, что снижает эффективность улавливания частиц.

Увеличение всех геометрических элементов прямоугольного сепаратора в 2 раза при прочих равных условиях позволяет повысить эффективность улавливания мелкодисперсных частиц до 75,2% (рис. 4). Очищение газового потока от частиц при различных начальных скоростях газа проходит практически идентично по эффективности. При начальных скоростях газа 0,5 и 2 м/с эффективность улавливания мелкодисперсных частиц равна 75,3 и 75,0% соответственно. Учитывая, что по мере движения газа через сепаратор происходит увеличение его скорости, влекущее снижение эффективности улавливания частиц сепаратором, решением может стать масштабирование всех элементов сепаратора, что позволит выровнять эффективность улавливания частиц в зависимости от скорости газа.

В ходе исследований установлено, что использование прямоугольного сепаратора позволяет улавливать до 75% частиц малого диаметра – от 1 до 10 мкм.

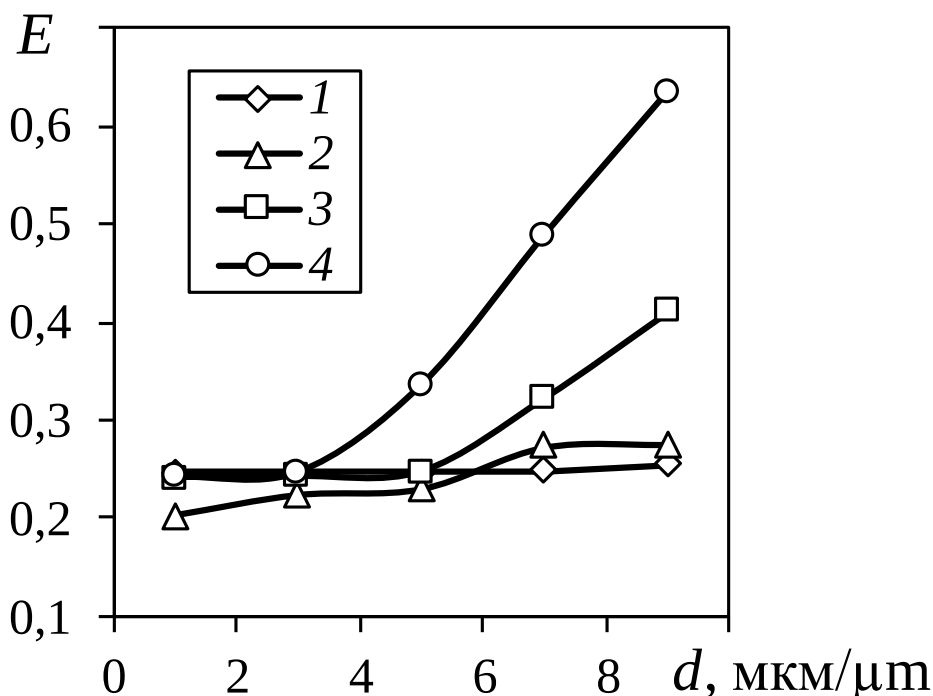


Рис. 2. Изменение эффективности улавливания мелкодисперсных частиц E от их диаметра d при начальной скорости газа w , м/с: 1 – 0,5; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 5

Fig. 2. Variation of the trapping efficiency of finely-divided particles E on their diameter d at the initial gas velocity w , m/s: 1 – 0.5; 2 – 1; 3 – 2; 4 – 5

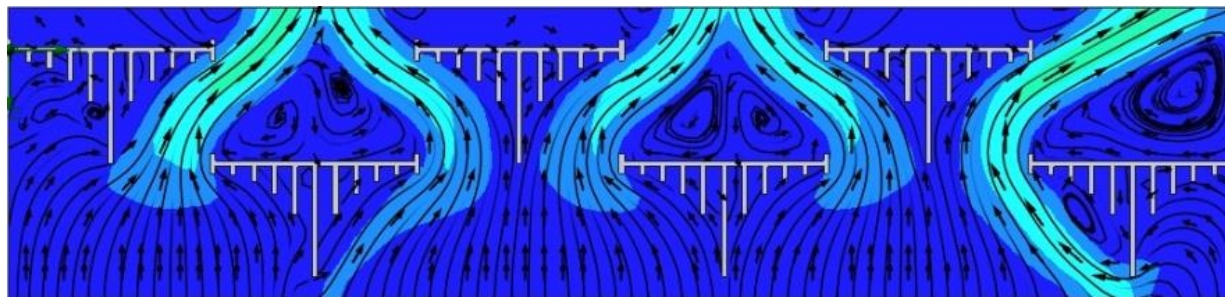


Рис. 3. Вектора скорости движения газового потока в прямоугольном сепараторе при начальной скорости газа $w = 0,5$ м/с (вид сверху)

Fig. 3. Velocity vectors of the gas flow in a rectangular separator with the initial gas velocity $w = 0.5$ m/s (top view)

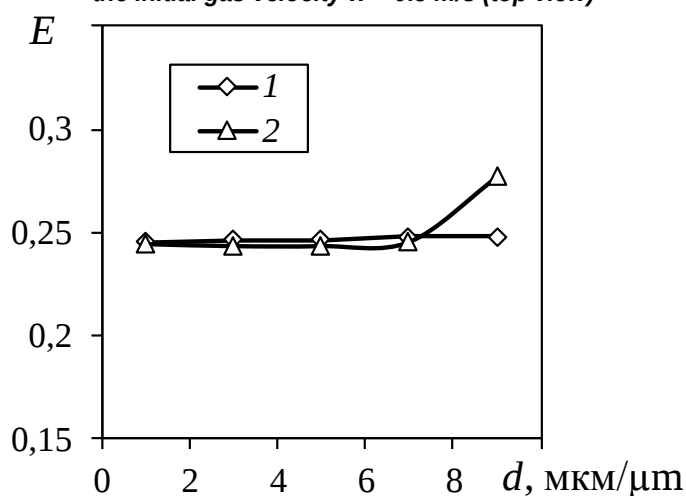


Рис. 4. Зависимость эффективности улавливания мелкодисперсных частиц E от их диаметра d при начальной скорости газа w , м/с: 1 – 0,5; 2 – 2

Fig. 4. Dependence of the trapping efficiency of finely-divided particles E on their diameter d at the initial gas velocity w , m/s: 1 – 0.5; 2 – 2

Выводы

Применение прямоугольного сепаратора может стать альтернативой использованию циклона, особенно актуально его применение для очистки газа от мелкодисперсных частиц диаметром до 10 мкм. Максимальная эффективность сепаратора достигается при нагнетании скорости газового потока менее 3 м/с. Увеличение габаритов сепаратора позволяет повысить эффективность улавливания частиц за счет вырав-

нивания среднерасходной скорости газового потока в сепараторе. Достоинства прямоугольного сепаратора: простота изготовления, малая металлоемкость, высокая степень улавливания мелкодисперсных частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4522.2018.8.

Библиографический список

1. Пыталева О.А., Фридрихсон О.В., Бердашкевич С.М. Исследование экологического аспекта при организации транспортных потоков в городах (на примере города Магнитогорска) // Современные проблемы транспортного комплекса России. 2016. Т. 6. № 1. С. 58–64.

2. Николаев А.Н., Дмитриев А.В., Латыпов Д.Н. Очистка газовых выбросов ТЭС, работающих на твердом и жидком топливе. Казань: Изд-во ЗАО «Новое знание», 2004. 136 с.
3. Асламова В.С., Асламов А.А., Ляпустин П.К., Гендин Д.В. Промышленные испытания группового



прямоточного циклона с промежуточным отбором пыли // Вестник ИргТУ. 2007. № 2-1 (30). С. 6–8.

4. Страус В. Промышленная очистка газов; пер. с англ. М.: Химия, 1981. 616 с.

5. Sagot B., Forthomme A., Ait Ali Yahia L., Bourdonnaye G. De La. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications // Journal of Aerosol Science. 2017. Vol. 110. P. 53–69. DOI: 1 <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.009>

6. Shuanshi Fan, Xi Wang, Xuemei Lang, Yanhong Wang. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant // Natural Gas Industry B. 2017. No. 6. P. 470–476. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2017.09.009>

7. Baltrenas P., Pranskevicius M., Venslovas A. Optimization of the New Generation Multichannel Cyclone

Cleaning Efficiency // Energy Procedia. 2015. Vol. 72. P. 188–195.

<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.027>

8. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Нгуен В.Л. Улавливание частиц из дымовых газов прямоугольными сепараторами // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. № 15. С. 78–80.

9. Пат. 171615 РФ, МПК В01Д 45/06, МПК В01Д 45/08. Устройство для тонкой пылегазоочистки. / А.В. Дмитриев, О.С. Дмитриева, И.Н. Мадышев, А.Н. Николаев. № 2017100315; заявл. 09.01.2017; опубл. 07.06.2017, Бюл. № 16.

10. Алиев Г.М.-А. Техника пылеулавливания и очистки промышленных газов: справочник. М.: Металлургия, 1986. 544 с.

References

1. Pytaleva O.A., Fridrikhsen O.V., Berdashkevich S.M. The study on environmental aspects in the organization of urban traffic flows (on the example of Magnitogorsk city). *Sovremennye problemy transportnogo kompleksa Rossii*. [Modern Problems of Russian Transport Complex]. 2016, vol. 6, no. 1, pp. 58–64. (In Russian).

2. Nikolaev A.N., Dmitriev A.V., Latypov D.N. *Ochistka gazovykh vybrosov TES, rabotayushchikh na tverdom i zhidkom toplive*. [Purification of gas emissions of TPP operating on solid and liquid fuels]. Kazan': ZAO "Novoe znanie" Publ., 2004, 136 p. (In Russian).

3. Aslamova V.S., Aslamov A.A., Lyapustin P.K., Gendin D.V. Industrial tests of a group direct-flow cyclone with intermediate dust extraction. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2007, no. 2-1 (30), pp. 6–8. (In Russian).

4. Straus V. *Promyshlennaya ochistka gazov* [Industrial cleaning of gases]. Moscow: Himiya Publ., 1981. 616 p. (In Russian).

5. Sagot B., Forthomme A., Ait Ali Yahia L., Bourdonnaye G. De La. Experimental study of cyclone performance for blow-by gas cleaning applications. *Journal of Aerosol Science*. 2017, vol. 110, pp. 53–69. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2017.05.009>

6. Shuanshi Fan, Xi Wang, Xuemei Lang, Yanhong Wang. Energy efficiency simulation of the process of gas hydrate exploitation from flue gas in an electric power plant. *Natural Gas Industry B*. 2017, no. 6, pp. 470–476. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2017.09.009>

7. Baltrenas P., Pranskevicius M., Venslovas A. Optimization of the New Generation Multichannel Cyclone Cleaning Efficiency. *Energy Procedia*. 2015, vol. 72, pp. 188–195. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.027>

8. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S., Nguen V.L. Flue gas particle collection by rectangular separators. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University]. 2017, vol. 20, no. 15, pp. 78–80. (In Russian).

9. Dmitriev A.V., Dmitrieva O.S., Madyshev I.N., Nikolaev A.N. *Ustroistvo dlya tonkoi pylegazo-ochistki* [A device for fine gas-dust trapping]. Patent RF, no. 2017100315, 2017.

10. Aliev G.M.-A. *Tekhnika pyleulavlivaniya i ochistki promyshlennykh gazov* [Technique of dust collection and cleaning of industrial gases]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1986, 544 p. (In Russian).

Критерии авторства

Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Нгуен В.Л. разработали прямоугольный сепаратор, провели исследования эффективности его работы и написали рукопись. Дмитриев А.В., Зинуров В.Э., Дмитриева О.С., Нгуен В.Л. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S., Nguyen V.L. have developed a rectangular separator, studies its efficiency and wrote a manuscript. Dmitriev A.V., Zinurov V.E., Dmitrieva O.S., Nguyen V.L. have equal author's 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.113.001

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-145-153>

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПЕРЕТОКОВ В КОНТРОЛИРУЕМЫХ СЕЧЕНИЯХ НА ОСНОВЕ МЕТОДОВ ОЦЕНИВАНИЯ СОСТОЯНИЯ

© И.Н. Колосок¹, Е.С. Аксаева², А.М. Глазунова³

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬЮ исследования является вычисление максимально допустимых перетоков (МДП) контролируемых сечений в режиме реального времени. Задача определения МДП выполняется как задача оценивания МДП при использовании метода взвешенных наименьших квадратов суммы остатков оценивания МДП. Желаемое решение находится за счет подбора весовых коэффициентов псевдоизмерений (ПИ) МДП. Значения весовых коэффициентов ПИ МДП определяются текущими условиями работы электроэнергетической системы (ЭЭС). **МЕТОДЫ.** Оценивание МДП основано на методе нормальных уравнений и методе контрольных уравнений, используемых при решении задачи оценивания состояния ЭЭС. Для оценивания МДП были выполнены небольшие модификации указанных методов. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ.** Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных по предложенному методу и по методу последовательного утяжеления. При корректном задании весовых коэффициентов ПИ МДП значения МДП, вычисленные по двум методам, совпадают с точностью, не превышающей точность измерений. **ВЫВОДЫ.** Представлен метод оценивания МДП. В качестве исходной информации использованы измеренные параметры режима и псевдоизмерения МДП. С помощью предложенного метода вычислен результирующий установившийся режим со значениями активных перетоков в контролируемых линиях, являющимися максимально допустимыми в текущих условиях работы ЭЭС при соблюдении режимных ограничений и при выполнении обязательств перед всеми потребителями.

Ключевые слова: оценивание состояния, максимально допустимый переток, псевдоизмерение, электроэнергетическая система.

Информация о статье. Дата поступления 25 января 2018 г.; дата принятия к печати 20 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Колосок И.Н., Аксаева Е.С., Глазунова А.М. Расчет максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях на основе методов оценивания состояния // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 145–153. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-145-153

STATE ESTIMATION METHOD-BASED CALCULATION OF MAXIMUM PERMISSIBLE FLOWS IN MONITORED SECTIONS

I.N. Kolosok, E.S. Aksaeva, A.M. Glazunova

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

¹Колосок Ирина Николаевна, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетических систем, e-mail: kolosok@isem.irk.ru
Irina N. Kolosok, Doctor of technical sciences, Senior Researcher, Leading Researcher of the Electrical Power Systems Department, e-mail: kolosok@isem.irk.ru

²Аксаева Елена Сергеевна, младший научный сотрудник отдела электроэнергетических систем, e-mail: akrsaeva@isem.irk.ru

Elena S. Aksaeva, Junior Researcher of the Electrical Power Systems Department, e-mail: akrsaeva@isem.irk.ru

³Глазунова Анна Михайловна, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела электроэнергетических систем, e-mail: glazunova@isem.irk.ru
Anna M. Glazunova, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Senior Researcher of the Electrical Power Systems Department, e-mail: glazunova@isem.irk.ru



ABSTRACT. The **PURPOSE** of the study is calculation of the maximum permissible flows (MPF) of the controlled sections in the real time mode. The task of MPF determination is performed as a MPF estimation problem when using the method of weighted least squares of the sum of MPF estimation residuals. The desired solution is found by the selection of the weight coefficients of MPF pseudo-measurements (PM). The values of the weight coefficients of MPF PM are determined by the current operating conditions of the electric power system (EPS). **METHODS.** MPF estimation is based on the method of normal equations and the method of control equations used for solving the estimation problem of EPS state. The methods indicated above were slightly modified for MPF estimation. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The results obtained by the proposed method and the method of successive weighting have been subjected to comparative analysis. When the weight coefficients of the MPF PM are set correctly the MPF values calculated by the two methods coincide with the accuracy that does not exceed the measurement accuracy. **CONCLUSIONS.** The method of MPF estimation is presented. The measured MPF mode parameters and pseudo-measurements are used as input information. The proposed method enabled to calculate the resulting steady mode with the values of active flows within monitored lines, which are the maximum permissible in the current operating conditions of EPS when mode limitations are observed and all consumer obligations are fulfilled.

Keywords: state estimation, maximum allowed flow, pseudo-measurement, electric power system

Information about the article. Received January 25, 2018; accepted for publication February 20, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Kolosok I.N., Aksaeva E.S., Glazunova A.M. State estimation method-based calculation of maximum permissible flows in monitored sections. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 145–153. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-145-153

Введение

Для обеспечения надежного функционирования электроэнергетической системы (ЭЭС) при управлении электрическим режимом дежурные диспетчеры Системного оператора (СО) непрерывно следят по данным телеметрии за соблюдением контролируемых параметров режима ЭЭС. Одним из таких параметров является переток активной мощности в контролируемых сечениях энергосистем. Контролируемым сечением называется сечение, перетоки мощности в котором контролируются и/или регулируются диспетчером соответствующего диспетчерского центра [1].

Наибольший переток активной мощности в сечении, удовлетворяющий всем требованиям к нормальным режимам, называется максимально допустимым перетоком активной мощности (МДП)⁴.

В настоящее время в условиях широкомасштабного внедрения информационных технологий стало возможным определение МДП в цикле обработки телеметрии. Точное и соответствующее текущей режимной ситуации в энергосистеме определение МДП позволит максимально полно использовать пропускную способность существующих линий электропередачи при выполнении требований к надежности электроснабжения потребителей.

В диспетчерских центрах СО ЭЭС в цикле расчета МДП выполняется: оценивание состояния для получения параметров установившегося режима; утяжеление полученного установившегося режима для определения предельного перетока по статической устойчивости для заданных контролируемых сечений; определение МДП в контролируемых сечениях, соответствующих нормативным запасам по статической аperiodической устойчивости. В условиях дефицита времени и требуемой эффективности оперативного управления такой подход к расчету величины максимально допустимых перетоков является достаточно сложной задачей, требующей множества промежуточных расчетов. В работах [2–6] для определения перетока активной мощности в предельном режиме используется метод последовательного утяжеления.

⁴СО 153-34.20.576-2003. Методические указания по устойчивости энергосистем; утв. приказом Минэнерго России от 30.06.2003 г. № 277 / SO 153-34.20.576-2003. Methodical guidelines on power system stability; as approved by the Order of the Ministry of Energy of Russia of June 30, 2003 No. 277.



На всех уровнях диспетчерского управления наиболее популярным инструментом расчета и анализа установившихся режимов ЭЭС и расчета статической устойчивости вне реального времени является программный комплекс RastrWin. Оценивание состояния выполняется в блоке ОС, реализованном в комплексе RastrWin по телеинформации, поступающей из оперативно информационного комплекса [7]. Широкое распространение RastrWin обусловлено удобной графической подсистемой для отображения электрической схемы и режима, наличием средств расширения функциональных возможностей программы, возможность автоматизации часто выполняемых однотипных операций [8].

Расчет МДП, в целях уменьшения объемов расчета, авторами настоящей статьи предлагается выполнять непосредственно по текущей телеметрической информации на основе методов оценивания состояния.

Метод оценивания МДП

Предлагаемый метод основан на идее о том, что по критерию взвешенных наименьших квадратов совокупность предельных режимов по условию нагрева или статической устойчивости для каждой линии заданных контролируемых сечений свести к одному (результатирующему) режиму, в котором по всем указанным линиям передается максимально допустимая мощность без нарушения ограничений для всех параметров режима.

Расчет максимально допустимых перетоков мощности с помощью разработанного метода заключается в разовом задании величины псевдоизмерения МДП (ПИ МДП), заведомо превышающей МПД контролируемой линии, и в последующем автоматическом определении реального МДП, соответствующего текущим параметрам режима с учетом корректировки заданных параметров режима в пределах регулирования. Измерения параметров режима, воздействием на которые достигается регулирование режима, далее называются измерениями регулируемых параметров. Измерения остальных параметров режима относятся к измерениям нерегулируемых параметров. Регулируемыми параметрами являются активные мощности в узлах, которые отвечают за баланс активной мощности в ЭЭС; модули напряжения и реактивные мощности в узлах, в которых возможно регулирование этих величин. Изменения регулируемых параметров режима рассматриваются как управляющие воздействия. Границы изменения регулируемых параметров режима определяются системными ограничениями. Нерегулируемые параметры режима выдерживаются в пределах точности измерения.

Исходной информацией для определения МДП является оперативная информация и величина ПИ МДП ($P_{lk}^{ПИ_МДП}$).

Вектор измерений выглядит как

$$\bar{y}^{PE3} = (U_i, \delta_i, Q_i, P_i, Q_{ij}, P_{ij}, P_{lk}^{ПИ_МДП}), \quad (1)$$

где U_i – модули напряжений в узлах; δ_i – фазы напряжений в узлах; P_i , Q_i – инъекции активной и реактивной мощностей в узлах соответственно; P_{ij} , Q_{ij} – перетоки активной и реактивной мощностей в линиях и трансформаторах соответственно; $P_{lk}^{ПИ_МДП}$ – ПИ МДП.

Задача расчета МДП заключается в поиске допустимых значений, максимально приближенных к заданному недопустимому $P_{lk}^{ПИ_МДП}$, и сводится к минимизации целевой функции взвешенных наименьших квадратов:

$$J(x) = (\bar{y} - y(\hat{x}))^T R_y^{-1} (\bar{y} - y(\hat{x})) + (P_{lk}^{ПИ_МДП} - P_{lk}(\hat{x}))^T R_p^{-1} (P_{lk}^{ПИ_МДП} - P_{lk}(\hat{x})), \quad (2)$$



где $\bar{y}$ – вектор измерений; R_y^{-1} – диагональная матрица весовых коэффициентов (в.к.) измерений; $P_{lk}^{ПИ МДП}$ – вектор ПИ МДП; R_p^{-1} – диагональная матрица в.к. ПИ МДП; $x = (U, \delta)$ – вектор состояния.

Получение желаемого режима с требуемой точностью из любой рассматриваемой точки возможно за счет корректного выбора в.к. ПИ МДП (R_p^{-1}). Задача подбора в.к. ПИ МДП решается заранее методом перебора в.к. с учетом системных ограничений и критерия подбора в.к. ПИ МДП [9].

Вычисление параметров результирующего режима

Постановка задачи расчета режима ЭЭС с помощью оценивания МДП несколько отличается от базовой постановки задачи оценивания состояния ЭЭС. С точки зрения ОС, оценивание МДП – это обработка текущей информации, которая содержит измерения с грубой ошибкой. Метод оценивания МДП распределяет эти ошибки на все измерения в разных пропорциях, которые определяются весовыми коэффициентами таким образом, чтобы активные перетоки в контролируемых сечениях оставались максимальными, а баланс активной мощности соблюдался за счет назначенных (указанных) генераторных узлов. Каждый генераторный узел выдает ограниченное количество мощности. Модули напряжений и генерация реактивной мощности выдерживаются в заданных пределах.

Задача оценивания МДП состоит в нахождении оценок МДП в контролируемых линиях сечения $\hat{P}_{lk}^{ПИ МДП}$, которые наиболее близки к ПИ МДП $P_{lk}^{ПИ МДП}$ при выполнении законов Ома и Кирхгофа с учетом текущих ограничений.

Оценивание МДП выполняется при соблюдении следующих условий:

- некорректируемые оценки $\hat{y}$ должны быть наиболее близки к измеренным значениям $\bar{y}$ в смысле критерия (2), первое слагаемое;
- корректируемые параметры режима y^k должны оставаться в заданных пределах;
- оценки МДП должны быть наиболее близки к ПИ МДП в соответствии с критерием (2), второе слагаемое.

Для определения параметров результирующего режима сначала вычисляются компоненты вектора состояния по всем измеренным параметрам режима путем минимизации критерия (2). Для этого производная $\frac{\partial J(x)}{\partial x}$ приравнивается нулю, что приводит к системе нелинейных уравнений

$$H^T R_{RES}^{-1} [\bar{y}^{RES} - y^{RES}(x)] = 0, \quad (3)$$

$$\text{где } H = \frac{\partial y^{рез}}{\partial x}, \quad R_{PE3}^{-1} = \begin{bmatrix} R_y^{-1} & 0 \\ 0 & R_p^{-1} \end{bmatrix}.$$

Данная нелинейная система решается итеративно. На каждой итерации система линеаризуется в точке решения и решается нормальная система уравнений относительно вектора поправок:

$$\Delta x^i = [H^{T(i)} R_{RES}^{-1} H^i]^{-1} H^{T(i)} R_{RES}^{-1} [\bar{y}^{RES} - y^{RES}(x^i)]. \quad (4)$$

Здесь H^i – матрица Якоби, вычисленная на i -й итерации.

Затем определяются компоненты вектора состояния:



$$x^l = x^{l-1} + \Delta x^l. \quad (5)$$

По полученному вектору состояния вычисляются перетоки активной и реактивной мощностей в линиях и трансформаторах P_{ij}, Q_{ij} [10]:

$$P_{ij} = U_i^2 \left(Y_a - \frac{g}{2} \right) k_{TT} + U_i U_j k_T (\cos \delta_{ij} Y_a + \sin \delta_{ij} Y_r); \quad (6)$$

$$Q_{ij} = U_i^2 \left(Y_r + \frac{b}{2} \right) k_{TT} + U_i U_j k_T (\cos \delta_{ij} Y_r - \sin \delta_{ij} Y_a), \quad (7)$$

где U_i и U_j – напряжение в узлах i и j ; Y_a – продольная активная проводимость линии; Y_r – продольная реактивная проводимость линии; $\frac{g}{2}$ – поперечная активная проводимость линии; $\frac{b}{2}$ – поперечная реактивная проводимость линии; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ – разность между фазами напряжений; k_{TP} – коэффициент трансформации ($k_T = k_{TT} = 1$ для линий без трансформаторной связи; $k_T = k_{TT} = k_{TP}$, если трансформатор стоит у данного узла; $k_{TT} = 1$, $k_T = k_{TP}$, если трансформатор стоит у смежного узла).

Затем вычисляются инъекции активной и реактивной мощностей в узлах:

$$P_i = \sum_{j=1}^k P_{ij} + U_i^2 G_i; \quad (8)$$
$$Q_i = \sum_{j=1}^k Q_{ij} + U_i^2 B_i,$$

где k – количество линий, отходящих от узла i ; G_i, B_i – активная и реактивная проводимости шунта соответственно.

Сравнительный анализ метода оценивания МДП и метода последовательного утяжеления

Описание схемы и сценария. Для проведения исследования была использована 14-ти узловая тестовая схема IEEE (рис. 1). Узел 1 – балансирующий, узлы 2, 3, 6 и 8 являются РУ-узлами. Узлы 1 и 5 являются узлами с регулируемыми параметрами режима. Узлы в остальной части схемы – это узлы с нерегулируемыми параметрами. Для данной схемы определяется МДП активной мощности по контролируемой линии 1–5, который соответствует текущим схемно-режимным ограничениям.

Оценивание МДП. На *подготовительном этапе* по условиям термической стойкости определяется ПИ МДП линии номинального напряжения 220 кВ, оно равно 280 МВт. Для подбора в.к. ПИ МДП заданы начальные условия: величина ограничений, значения ПИ МДП, начальное и конечное значение весовых коэффициентов, длина шага, количество шагов (рис. 2). В данной схеме узлами с регулируемыми параметрами режима являются узлы 1, 5. По итогам заданных 100 расчетов определяются в.к. МДП, которые обеспечивают оптимальный результат задачи оценивания МДП.

На *основном этапе* выполняется оценивание МДП с полученными значениями в.к. ПИ МДП. Результатами являются оценки значений МДП в контролируемых линиях и оценки остальных параметров режима. Оценка МДП в линии 1-5, полученная методом оценивания МДП, составляет 141,87 МВт.



Определение МДП методом последовательного утяжеления. Для реализации метода последовательного утяжеления применялись программы, написанные в среде Matlab [11]. Исходные данные представлены на рис. 3.

Результатами расчета являются значения перетока в контролируемой линии в установившихся текущем и результирующем режимах (таблица).

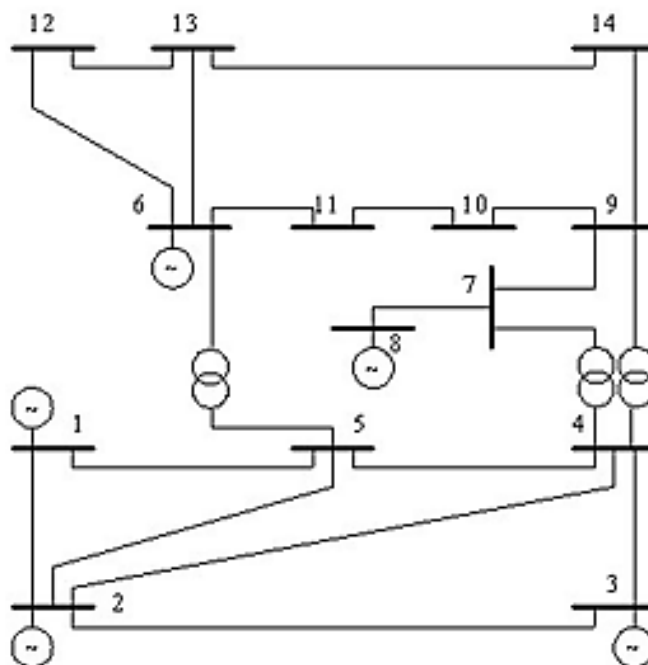


Рис. 1. Конфигурация 14-ти узловой схемы IEEE
Fig. 1. Configuration of the 14-node IEEE circuit

	Параметр	Номер узла 1	Номер узла 2	Предел точности(+ -x)	Регулирование	Начало	Конец
1	P	1			☒	0	600
2	Q	1			☒	-100	100
3	U	1			☒	-100	100
4	P	5		100	☐		
5	Q	5			☒	-100	100
6					☐		
7					☐		
8					☐		
9					☐		
10					☐		
11					☐		
12					☐		

☒ Задать пределы регулирования линий

	Параметр	№ 1-го узла	№ 2-го узла	Предел	R начало	шаг	Количество
1	P	1	5	280	1	1	100

Рис. 2. Вычисление весовых коэффициентов ПИ МДП
Fig. 2. Calculation of MPF PM weight coefficients



```

%% bus data
% bus_i type Pd Qd Gs Bs area Vm Va baseKV zone Vmax Vmin
mpc.bus = [
1 3 0 0 0 0 1 1.06 0 0 1 1.06 1;
2 2 21.7 12.7 0 0 1 1.045 -4.98 0 1 1.06 1;
3 2 94.2 19 0 0 1 1.01 -12.72 0 1 1.06 1;
4 1 47.8 -3.9 0 0 1 1.019 -10.33 0 1 1.06 1;
5 1 7.6 1.6 0 0 1 1.02 -8.78 0 1 1.06 1;
6 2 11.2 7.5 0 0 1 1.07 -14.22 0 1 1.06 1;
7 1 0 0 0 0 1 1.062 -13.37 0 1 1.06 1;
8 2 0 0 0 0 1 1.09 -13.36 0 1 1.06 1;
9 1 29.5 16.6 0 19 1 1.056 -14.94 0 1 1.06 1;
10 1 9 5.8 0 0 1 1.051 -15.1 0 1 1.06 1;
11 1 3.5 1.8 0 0 1 1.057 -14.79 0 1 1.06 1;
12 1 6.1 1.6 0 0 1 1.055 -15.07 0 1 1.06 1;
13 1 13.5 5.8 0 0 1 1.05 -15.16 0 1 1.06 1;
14 1 14.9 5 0 0 1 1.036 -16.04 0 1 1.06 1;
];

%% generator data
% bus Pg Qg Qmax Qmin Vg mBase status Pmax Pmin Pc1 Pc2 Qc1min Qc1max Qc2min Qc2max
mpc.gen = [
1 232.4 -16.9 10 0 1.06 100 1 332.4 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
2 40 42.4 50 -40 1.045 100 1 140 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
3 0 23.4 40 0 1.01 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
6 0 12.2 24 -6 1.07 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
8 0 17.4 24 -6 1.09 100 1 100 0 0 0 0 0 0 0 0 0;
];

%% branch data
% fbus tbus r x b rateA rateB rateC ratio angle status angmin angmax
mpc.branch = [
1 2 0.01938 0.05917 0.0528 0 0 0 0 0 1 -360 360;
1 5 0.05403 0.22304 0.0492 0 0 0 0 0 1 -360 360;
2 3 0.04699 0.19797 0.0438 0 0 0 0 0 1 -360 360;
2 4 0.05811 0.17632 0.034 0 0 0 0 0 1 -360 360;
2 5 0.05695 0.17388 0.0346 0 0 0 0 0 1 -360 360;
];

```

Рис. 3. Исходные данные для программы MatPower
Fig. 3. Input data for MatPower

Результаты расчета МДП 14-ти узловой схемы Calculation results of 14 node circuit MPF

Номера узлов, ограничивающих линию / No. of nodes limiting the line	Значения перетока активной мощности, полученные / Values of active power flow obtained		Значения МДП, полученные методом / MPF values obtained by the method of	
	при расчете установившегося режима / under set mode calculation	при оценивании состояния / under state estimation	утяжеления / weighting	оценивания МДП / MPF estimation
1-5	75,51	75,49	140	141,87

Из таблицы видно, что значения перетока активной мощности, вычисленные разными способами, отличаются друг от друга на величину, не превышающую погрешности измерения.

Заключение

Расчет МДП является важной задачей для обеспечения надежного и эффективного диспетчерского управления ЭЭС. Расчет МДП выполняется задолго до эксплуатационного режима, вследствие этого рассчитанное значение МДП может не соответствовать текущей схемно-режимной ситуации, поэтому определять МДП следует, исходя из реальных условий



работы ЭЭС. Определение МДП в режиме реального времени позволяет повысить эффективность управления за счет более полного использования пропускной способности межсистемных связей.

Разработан метод оценивания МДП, итогом которого является результирующий установившийся режим, представляющий собой оценки максимально допустимых перетоков в контролируемых сечениях, оценки регулируемых параметров режима в диапазоне заданных ограничений, оценки нерегулируемых параметров текущего режима в остальной части ЭЭС в диапазоне заданной точности.

Выполнен сравнительный анализ результатов, полученных по методу оценивания МДП и по методу последовательного утяжеления. Результаты расчета, полученные по предложенной методике, совпадают с результатами расчетов по методу последовательного утяжеления с точностью 1,87 МВт, что не превышает точности измерения.

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

Библиографический список

1. Управление электрическим режимом в реальном времени [Электронный ресурс] // Системный оператор Единой энергетической системы. URL: <http://so-ups.ru/> (11.01.2018).
2. Piyush Warhad Pande, Sachin Kumar, A.K. Sinha. Total Transfer Capability calculation using Modified Repeated Power flow Method // Annual IEEE. India Conference (INDICON). (New Delhi, India, 17–20 December 2015). <https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443378>
3. Chun-Lien Su, Chan-Nan Lu. Two-Point Estimate Method for Quantifying Transfer Capability Uncertainty // IEEE Transactions on Power systems. 2005. Vol. 20. Issue 2. P. 573–579. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846233>
4. Mutlu Yilmaz, Bulent Bilir. Determination of Power Transfer Capability by Incremental Changes // Electrical Power & Energy Conference (EPEC). (Halifax, Canada, 21–23 August 2013). <https://doi.org/10.1109/EPEC.2013.680295>
5. Piyush Warhad Pande, A.K. Sinha Total Transfer Capability Calculation Considering Variation of Ambient Temperature – a Case Study // Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC). (Bhubaneswar, India, 15–17 October 2015). <https://doi.org/10.1109/PCITC.2015.7438092>
6. A.N. Al-Masri, M.Z.A. Ab. Kadir, H. Hizam, N. Mariun, S. Yusof. Control Action based on Steady-State Security Assessment using an Artificial Neural Network // IEEE International Conference on Power and Energy. (Kuala Lumpur. Malaysia, 29 November – 1 December 2010). <https://doi.org/10.1109/PECON.2010.5697671>
7. Максименко Д.М., Машалов Е.В., Неймин В.Г. Оценивание состояния на базе оптимизационного алгоритма в ПК RastrWin // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2013. № 2 (69). С. 36–43.
8. Программный комплекс «RastrWin». Компонентная архитектура – множество вариантов использования [Электронный ресурс] // RASTR. URL: http://www.rastrwin.ru/rastr/componental_architecture.php (11.01.2018).
9. Глазунова А.М., Аксаева Е.С. Модифицированное оценивание состояния для решения диспетчерских задач при управлении режимами электроэнергетической системы // Электричество. 2013. № 12. С. 21–29.
10. Гамм А.З. Вероятностные модели режимов электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука, 1993. 133 с.
11. Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchez & others. Matpower 5.1 User's Manual. Power Systems Engineering Research Center (Pserc). 2015.

References

1. *Upravlenie elektricheskim rezhimom v real'nom vremeni. Sistemnyi operator Edinoi energeticheskoi sistemy* [Real-time Control of the Electrical Mode. System Operator of the Unified Energy System]. Available at: <http://so-ups.ru/> (accessed 11 January 2018)
2. Piyush Warhad Pande, Sachin Kumar, A.K. Sinha. Total Transfer Capability calculation using Modified Repeated Power flow Method. Annual IEEE. India Conference (INDICON). (New Delhi, India, 17–20 December 2015). <https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443378>
3. Chun-Lien Su, Chan-Nan Lu. Two-Point Estimate Method for Quantifying Transfer Capability Uncertainty. IEEE Transactions on Power systems. 2005. Vol. 20. Issue 2. P. 573–579. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2005.846233>
4. Mutlu Yilmaz, Bulent Bilir. Determination of Power Transfer Capability by Incremental Changes. Electrical Power & Energy Conferenc (EPEC). (Halifax, Canada, 21–23 August 2013). <https://doi.org/10.1109/EPEC.2013.680295>
5. Piyush Warhad Pande, A.K. Sinha Total Transfer Capability Calculation Considering Variation of Ambient



- Temperature – a Case Study. Power, Communication and Information Technology Conference (PCITC). (Bhubaneswar, India, 15–17 October 2015). <https://doi.org/10.1109/PCITC.2015.7438092>
6. A.N. Al-Masri, M.Z.A. Ab. Kadir, H. Hizam, N. Mariun, S. Yusof. Control Action Based on Steady-State Security Assessment Using an Artificial Neural Network. IEEE International Conference on Power and Energy. (Kuala Lumpur, Malaysia, 29 November – 1 December 2010). <https://doi.org/10.1109/PECON.2010.5697671>
7. Maksimenko D.M., Mashalov E.V., Neuimin V.G. The State Estimation Based on Optimization Algorithm in RastrWin Software. *Izvestiya NTTs Edinoi energeticheskoi sistemy* [STC of Unified Power System Proceedings]. 2013, no. 2 (69), pp. 36–43. (In Russian)
8. *Programnyi kompleks «RastrWin». Komponentnaya arkhitektura – mnozhestvo variantov ispol'zovaniya* [Software package "RastrWin". Component architecture – multi-variant use. RASTR]. RASTR. Available at: http://www.rastrwin.ru/rastr/componental_architecture.php (accessed 11 January 2018)
9. Glazunova A.M., Aksaeva E.S. Modified state estimation for solving dispatching tasks under electric power system mode control. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2013, no. 12, pp. 21–29. (In Russian).
10. Gamm A.Z. *Veroyatnostnye modeli rezhimov elektroenergeticheskikh sistem* [Probabilistic models of electric power system modes]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1993, 133 p. (In Russian).
11. Ray D. Zimmerman, Carlos E. Murillo-Sanchez & others. Matpower 5.1 User's Manual. Power Systems Engineering Research Center (PSERC). 2015.

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-154-171>

ТЕХНИЧЕСКОЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ЗАРЯДНО-РАЗРЯДНОГО ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АККУМУЛЯТОРНЫХ БАТАРЕЙ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

© Г.Г. Константинов¹, Фам Конг Тао², В.И. Киселев³

¹Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

³АО ПКБ «Интеллектуальные робастные интегрированные системы»,
346400, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Дубовского, 15.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Техническое совершенствование зарядно-разрядного электротехнического комплекса аккумуляторных батарей, создание структурной схемы автономного зарядно-разрядного электротехнического комплекса (АЗРЭТК) с мониторингом состояния аккумуляторных батарей подводных аппаратов. **МЕТОДЫ.** Для достижения цели использовались методы математического моделирования, экспериментальные исследования на практических установках. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Предложена математическая модель АЗРЭТК в программе Matlab Simulink. Проведено сравнение режимов заряда-разряда АЗРЭТК: напряжение на борне при зарядных, разрядных токах, зависимости напряжения при заряде токами, тока разряда, емкость, плотность электролита в масштабе реального времени на модели и на практической установке, показавшее хорошую сходимость полученных результатов. **ВЫВОДЫ.** Сделан выбор компонентов для новой структуры АЗРЭТК. Применение дизельного двигателя–вентильно-индукторного генератора расширяет функциональные возможности внедренного АЗРЭТК, обеспечивает его автономность. Исследования показали, что при измерениях в масштабе реального времени при заряде токами 400; 900; 1800 и 3600 А погрешность определения напряжения не превышала 2,7%. Погрешность определения измеренного тока составила 2,74%, заданного тока – 1,25%, что удовлетворяет заданным требованиям.

Ключевые слова: автономный зарядно-разрядный электротехнический комплекс, аккумуляторные батареи, дизельный двигатель–вентильно-индукторный генератор, напряжение заряда, ток заряда и ток разряда в режиме реального времени.

Информация о статье. Дата поступления 14 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 22 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Константинов Г.Г., Фам Конг Тао, Киселев В.И. Техническое совершенствование автономного зарядно-разрядного электротехнического комплекса аккумуляторных батарей подводных аппаратов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 154–171. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-154-171

TECHNICAL IMPROVEMENT OF AN AUTONOMOUS CHARGE-DISCHARGE ELECTROTECHNICAL COMPLEX OF UNDERWATER DEVICE STORAGE BATTERIES

G.G.Konstantinov, Pham Cong Tao, V.I. Kiselev

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

¹Константинов Геннадий Григорьевич, кандидат технических наук, профессор, e-mail: kgg40@mail.ru
Gennady G. Konstantinov, Candidate of technical sciences, Professor, e-mail: kgg40@mail.ru

²Фам Конг Тао, аспирант, e-mail: Tao.phamcong@gmail.com
Pham Cong Tao, Postgraduate student, e-mail: Tao.phamcong@gmail.com

³Киселев Василий Иванович, технический директор, e-mail: kis1982@yandex.ru
Vasily I. Kiselev, Technical Director, e-mail: kis1982@yandex.ru



Platov South-Russian State Polytechnic University,
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk, 346400, Russian Federation
"Intelligent Robust Integrated Systems" JSC PDB,
15, Dubovsky St., Novocherkassk, 346400, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is technical improvement of the charge-discharge electrotechnical complex of storage batteries and development of the structural diagram of an autonomous charge-discharge electrotechnical complex (ACDEC) with the monitoring of underwater device battery state. **METHODS.** To achieve the set goal the methods of mathematical modeling have been used as well as experimental researches on practical installations. **RESULTS.** A mathematical model of ACDEC is proposed in Matlab Simulink software. ACDEC charge-discharge modes are compared: voltage on the terminal at charge/discharge currents, dependences of voltage under the charge by currents, discharge current, capacitance, electrolyte density in the real time scale on models and a practical installation that have demonstrated good convergence of the results obtained. **CONCLUSIONS.** The components for the new structure of ACDEC are selected. The use of the diesel engine – a switched inductor-type generator extends the functionality of the introduced ACDEC ensuring its autonomy. The studies have shown that the error of voltage determination did not exceed 2.7%, the error of measured current determination was 2.74% and set current – 1.25% (which meets the specified requirements) when performing real time measurements under the charge by the currents of 400; 900; 1800 и 3600 A.

Keywords: *autonomous charge-discharge electrotechnical complex, storage batteries, diesel engine – a switched inductor-type generator, charge voltage diagram, real time charge current and current discharge*

Information about the article. Received February 14, 2018; accepted for publication February 22, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Konstantinov G.G., Pham Cong Tao, Kiselev V.I. Technical improvement of an autonomous charge-discharge electrotechnical complex of underwater device storage batteries. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 154–171. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-154-171

Введение

В последние два десятилетия в судостроении происходили быстрые и радикальные изменения, связанные с совершенствованием и применением зарядно-разрядных комплексов аккумуляторных батарей (ЗРК АКБ). В настоящее время такие ЗРК АКБ нашли применение на судах практически всех видов дизель-электрических подводных лодок, подводных аппаратов (батискафы, необитаемые глубоководные аппараты и т.д.) с аккумуляторными батареями, являющимися единственными источниками электроэнергии в подводном положении, а также надводных кораблей с электродвижением, имеющим в качестве резервного (аварийного) источника электропитания аккумуляторные батареи. В известных ЗРК АКБ отсутствует возможность автоматизированного контроля текущего технического состояния каждого элемента аккумуляторной батареи как в процессе разряда, так и процессе заряда. Вследствие этого автоматические зарядные устройства обеспечивают заряд только по

одному критерию – пока напряжение на аккумуляторах не достигнет определенного заранее заданного значения.

Известные ЗРК не учитывают мониторинга технического состояния каждого элемента АКБ [1–3], и по этой причине ограничивается срок эксплуатации аккумуляторных батарей. Дальнейшее совершенствование ЗРК АКБ возможно путем повышения эффективности эксплуатации аккумуляторных батарей за счет мониторинга технического состояния каждого элемента АКБ, благодаря которому увеличивается их ресурс и срок службы, а также повышается автономность подводных аппаратов. Существенным толчком к техническому совершенствованию и исследованию автономного ЗРК АКБ на базе дизель-генератора [4, 5] послужило бурное развитие и внедрение систем мониторинга с автоматизированным предоставлением оператору полномасштабной и достоверной контрольно-диагностической информации о текущем техническом состоянии каждого элемента в



масштабе реального времени с использованием системы контроля и диагностики⁴ [6].

Поэтому техническое совершенствование ЗРК АКБ, позволяющее осуществлять мониторинг состояния каждого элемента АКБ, является актуальной задачей.

Единственным источником энергии дизель-электрической подводной лодки в подводном положении являются АКБ. С целью успешной эксплуатации (заряда и разряда) и продления жизненного цикла АКБ по техническому заданию, согласованному с АО ЦКБ МТ «Рубин» (г. Санкт-Петербург), в Новочеркасском АО «ИРИС» разработан, изготовлен и передан в эксплуатацию автономный зарядно-разрядный электротехнический комплекс (АЗРЭТК) [7]. Данный АЗРЭТК работает от высоковольтной стационарной сети напряжением 6–10 кВ и успешно обеспечивает автоматизированный заряд-разряд АКБ на различных объектах промышленного и военного назначения. Ввиду трудности организации трехфазной сети высокого напряжения в

условиях влажного климата, в частности, во Вьетнаме, где относительная влажность воздуха более 80% и температура +40°C, применение АЗРЭТК с входным высоковольтным трансформатором по патенту [7] без доработок практически невозможно.

В известных ЗРК АКБ (таблица) отсутствует возможность автоматизированного контроля текущего технического состояния каждого элемента аккумуляторной батареи как в процессе разряда, так и в процессе заряда. Мониторинг технического состояния каждого элемента АКБ не проводится, вследствие чего ограничивается срок эксплуатации АКБ [1–3].

На рис. 1 представлен мобильный зарядно-разрядный комплекс (МЗРК), в состав которого входят следующие элементы (приоритет по составу и размещению системы охлаждения МЗРК): 1 – шкаф ЭВМ; 2 – устройство сопряжения; 3 – дроссели; 4 – насос; 5 – вентиляторы; 6 – радиаторы; 7 – расширительные бачки; 8 – трубопроводы; 9 – щит распределительный силовой; 10 – щит постоянного тока; 11 – стойка силовая.

Основные параметры ЗРУ

Basic parameters of the charge-discharge device

Параметр / Parameter	Значение / Value
Регулируемый выходной зарядный ток, А / Controlled output charge current, A	300–3600
Выходной разрядный ток (при лечебных циклах), А / Output discharge current (at treatment cycles), A	300–1850
Максимальный ток заряда, А / Maximum charge current, A	3600
Дискретность установки токов, А / Discreteness of current setting, A	10
Выходное напряжение при заряде, В / Output voltage at charge, V	150–350
Точность поддержания токов и напряжения / Accuracy of current and voltage maintenance, %	3
Коэффициент полезного действия / Efficiency factor, %	не менее 91* / not less than 91*
Режим работы / Operation mode	продлжительный / continuous

*В номинальном режиме работы / at rated operation.

⁴Савченко А.В. Разработка корабельной автоматизированной системы контроля и диагностики аккумуляторных батарей дизель-электрических подводных лодок: дис. ... канд. техн. наук; 05.13.06. Санкт-Петербург, 2007. 180 с. / Savchenko A.V. Development of shipboard automated monitoring and diagnostic system for diesel-electric submarine batteries: Candidate's Dissertation in technical sciences; 05.13.06. St. Petersburg, 2007, 180 p.

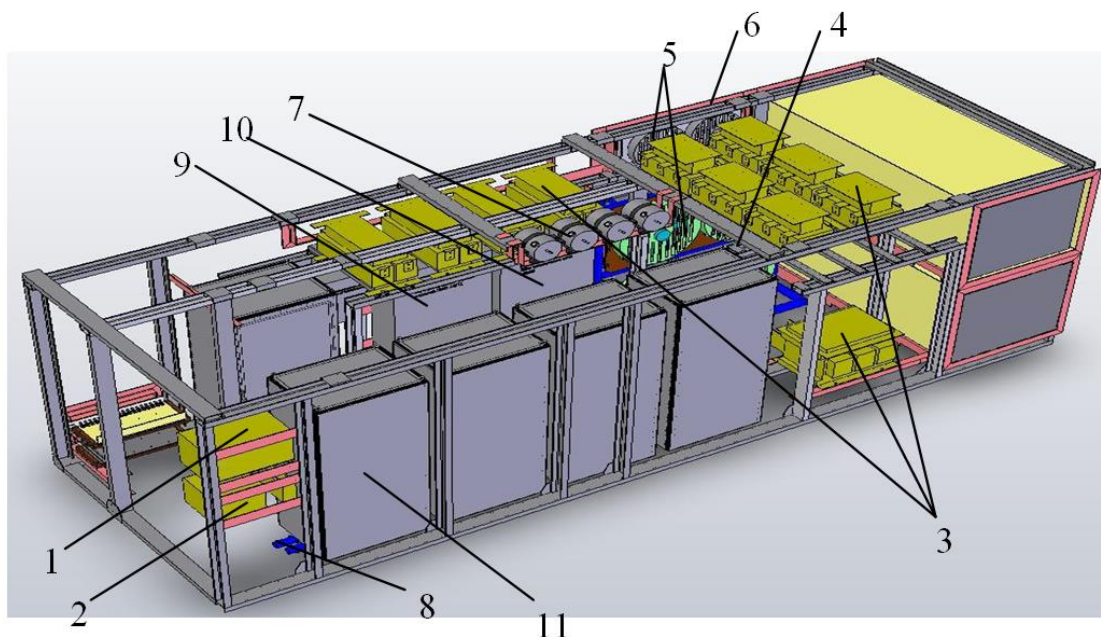


Рис. 1. Общий вид МЗРК
Fig. 1. General view of an autonomous charge-discharge complex

Функциональная схема МЗРК приведена на рис. 2. Комплекс состоит из следующих функциональных узлов:

- *комплектная трансформаторная подстанция* (КТП) – высоковольтная часть зарядно-разрядного устройства (ЗРУ): щит высоковольтный (ЩВ), к которому подключается промышленная сеть трехфазного переменного напряжения величиной $(10 \pm 0,5 (6 \pm 0,3))$ кВ, частотой 50 Гц; высоковольтный автоматический выключатель (ВАВ); трансформатор Т1 напряжением 10(6)/0,4 кВ; автоматические выключатели QF1–QF4;

- *низковольтная часть ЗРУ*, включающая: нагрузочное устройство (НУ); блок сопряжения (БС); шкаф ЭВМ (на рис. 2 не показан); блок рекуператора (БР); блоки выпрямителей (БВ1 и БВ2); блок понизителя (БП) (рис. 3); батарейный автомат (БА), к которому подключается аккумуляторная батарея (АКБ); блок заряда конденсаторов (БЗК); щит питания собственных нужд (ЩПСН); автоматический выключатель S; блок преобразователя для питания корабельных потребителей (БП120). Соединения между силовыми блоками выполнено шинами.

Исходя из технических данных и предложенных на рынке транзисторов данной мощности для блока понизителя был выбран транзистор фирмы EUPEC FZ3600R17KE3.

Назначение составных частей МЗРК заключается в следующем:

- ЗРУ предназначено для проведения заряда-разряда АКБ (2 группы по 120 свинцово-кислотных аккумуляторов) при питании от трехфазной сети напряжением 10 кВ (6 кВ), частотой 50 Гц;

- НУ обеспечивает поддержание разрядных токов 400, 800, 920 и 1850 А при проведении лечебного цикла АКБ, при начальном напряжении на АКБ 320–290 В до достижения конечного напряжения 210 В;

- преобразователь обеспечивает питание корабельных потребителей (радиоэлектронная аппаратура, аппаратура управления, освещение, электроприводы (максимальная мощность двигателя ~30 кВт) постоянным током в режиме стабилизации напряжения в диапазоне 175–320 В;

- комплект щитов предназначен для подачи питания на заказ и для технологического обеспечения базирования.

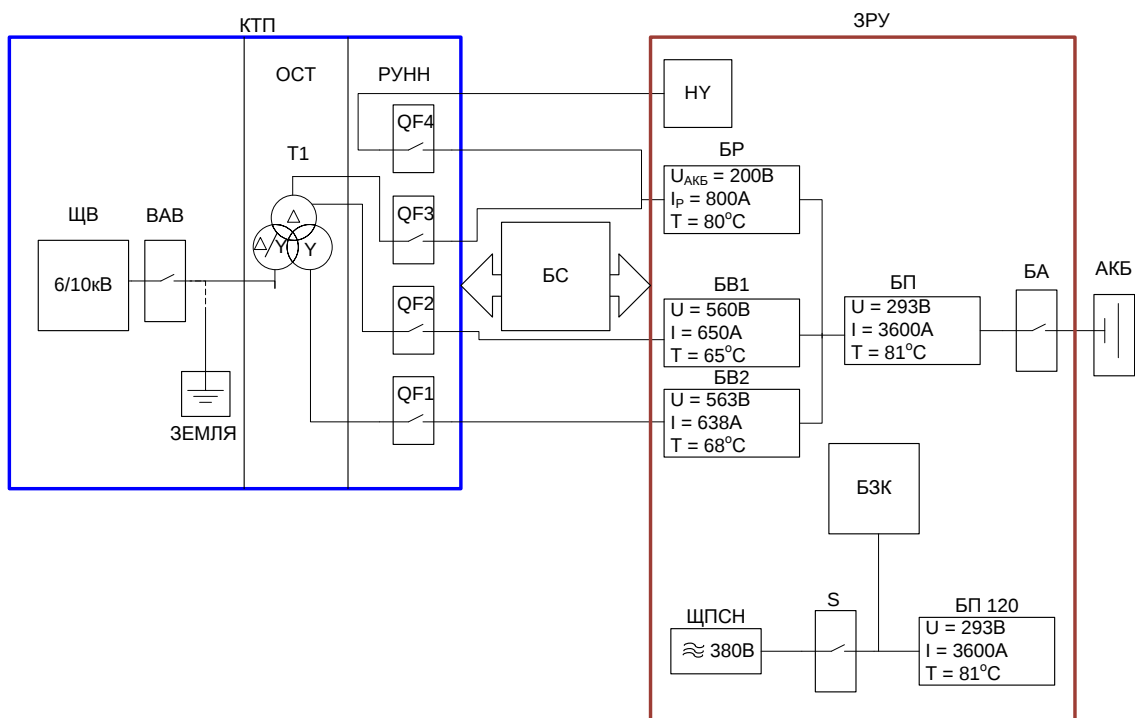


Рис. 2. Функциональная схема МЗРК
Fig. 2. Functional diagram of the autonomous charge-discharge complex

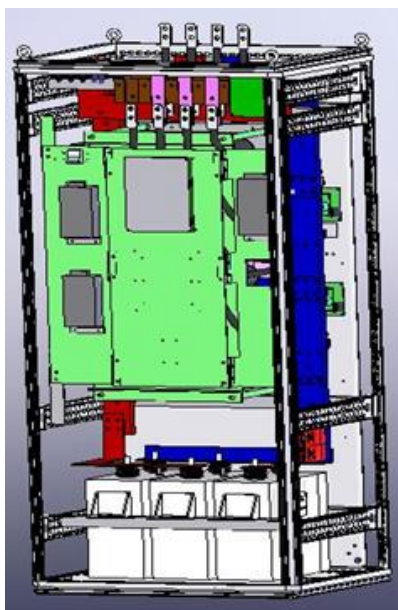


Рис. 3. Внешний вид блока понизителя мощного зарядно-разрядного комплекса
Fig. 3. Exterior view of the reducing block of the powerful charge-discharge complex

Автоматизированная система управления

Управление МЗРК осуществляется с помощью распределенного аппаратно-программного комплекса, состоящего из шкафа ЭВМ и микропроцессорных контроллеров, интегрированных (встроенных)

в следующие блоки ЗРУ:

– блок заряда конденсаторов (БЗК); блок выпрямителя 1 (БВ1); блок выпрямителя 2 (БВ2); блок сопряжения (БС); блок рекуперации (БР); блок понизителя (БП);

блок преобразователя (БП120);

– шкаф ЭВМ и микропроцессорные контроллеры блоков ЗРУ, в которых установлены программы, обеспечивающие выполнение ими необходимых функций контроля и управления. Блок-схема информационного взаимодействия шкафа ЭВМ с блоками ЗРУ представлена на рис. 4.

В работе предложен модернизированный АЗРЭТК, обеспечивающий полную автономность и независимость от стационарной сети напряжением 6–10 кВ за счет применения дизель-генератора (ДГ) с вентильно-индукторной машиной (ВИМ).

Предложенный АЗРЭТК также предназначен для заряда регулируемым постоянным током корабельных АКБ с возможностью обеспечения режима разряда с рекуперацией химической энергии, накопленной в АКБ и с обеспечением проведения заряда-разряда двух групп по 120 свинцово-кислотных аккумуляторов при питании дизельного двигателя–вентильно-индукторного генератора (ДД–ВИГ).

На рис. 5 приведена структурная схема АЗРЭТК, где цифрами обозначены: 1 – сеть переменного тока с группой потре-

бителей переменного тока; 2, 3, 27, 28, 29 – автоматические выключатели; 4 – нагрузка; 5 – импульсный трансформатор; 6 – щит дизель-генератора; 7 – комплекс агрегированных средств управления электро-энергетической системой; 8 – последовательно соединенные АКБ; 9 – первый АКБ; 10 – второй АКБ; 11 – n -й АКБ (отрицательная клемма первого аккумулятора 9 подключена к положительной клемме второго аккумулятора 10 и т.д.); 12 – датчик тока; 13 – блок инвертора; 14 – выпрямитель; 15 – блок силовых IGBT-ключей; 16 – ДД–ВИГ; 17, 20, 23 – датчики напряжения; 18, 21, 24 – датчики уровня электролита; 19, 22, 25 – датчики температуры электролита; 26 – датчик напряжения; 30 – шина сети электроэнергетической системы; 31, 32, 33 – устройства контроля параметров АКБ; 34 – шина информационного обмена (CAN-bus интерфейс) распределенных систем реального времени; 35 – шкаф ЭВМ автоматизированной подсистемы мониторинга; 36 – блок обработки информации; 37 – гребной винт; 38 – гребной электродвигатель; 39 – щит гребного электродвигателя.

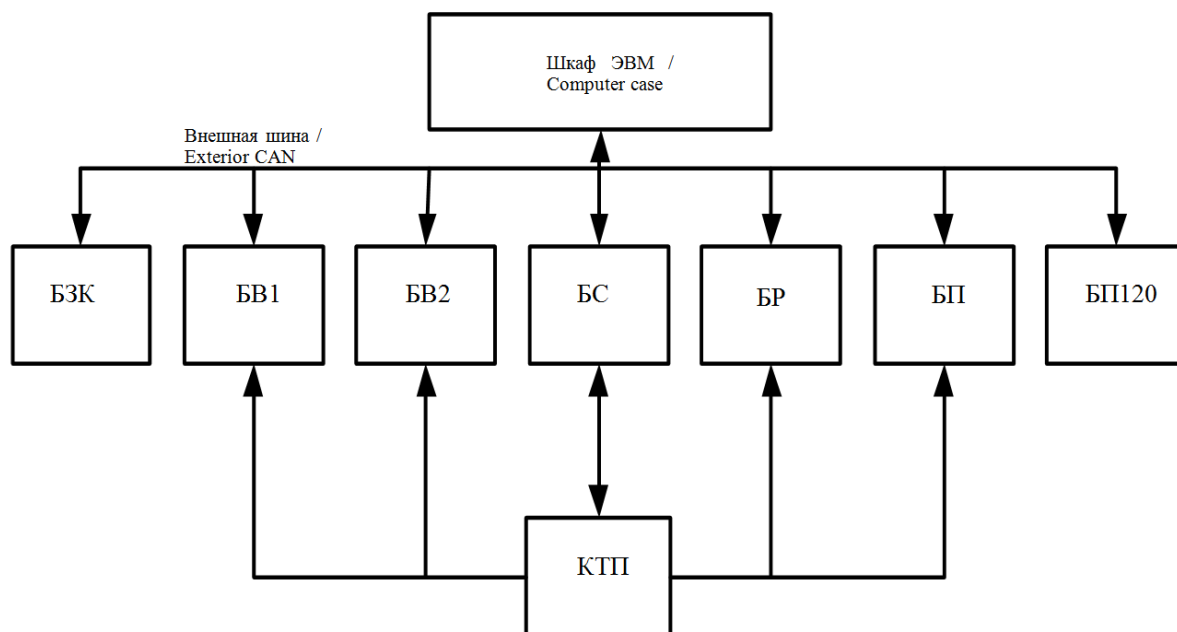


Рис. 4. Блок-схема информационного взаимодействия ЭВМ с блоками ЗРУ
Fig. 4. Block diagram of computer and charge-discharge device information interaction

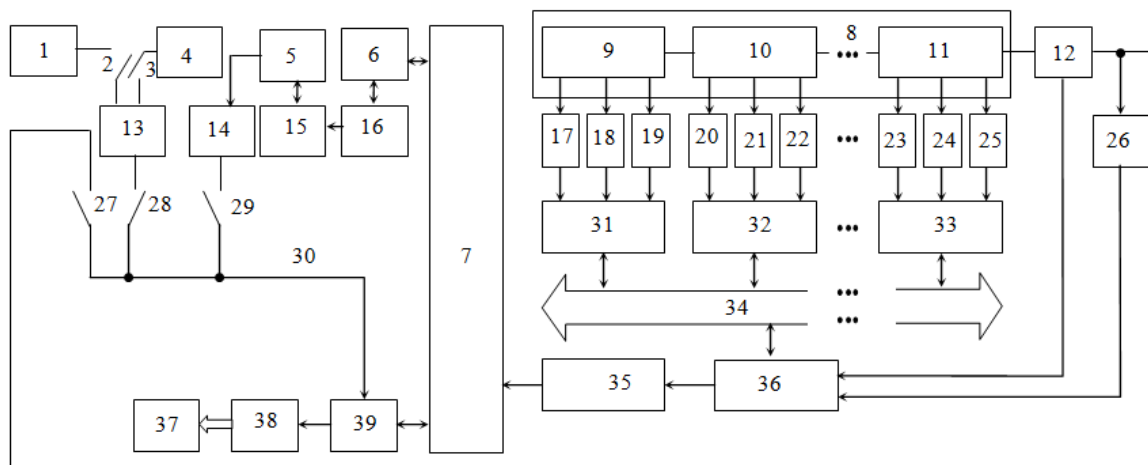


Рис. 5. Структурная схема АЗРЭТК

Fig. 5. Structural diagram of the autonomous charge-discharge electrotechnical complex (ACDEC)

Комплекс АЗРЭТК обеспечивает [6, 8]:

- мониторинг текущего технического состояния аккумуляторных батарей, включая каждую банку аккумулятора;

- предоставление оператору полномасштабной и достоверной контрольно-диагностической информации о текущем техническом состоянии каждого элемента в реальном времени с использованием системы контроля и диагностики (СКД);

- повышение эффективности эксплуатации аккумуляторных батарей и, как следствие, увеличение их ресурса и срока службы, а также повышение автономности подводной лодки;

- максимальную экономию электроэнергии в сети напряжения переменного тока (восполнение электроэнергии для питания потребителей, подключенных к этой сети) за счет рекуперации в полном объеме всей химической энергии, накопленной в аккумуляторной батарее, при выполнении многократных циклов заряда-разряда аккумуляторной батареи;

- эффективный тренировочный процесс вплоть до полного разряда аккумуляторной батареи;

Целью настоящей статьи является исследование на математической модели функциональных возможностей АЗРЭТК, построенного с использованием ДД-ВИГ и полупроводниковых преобразователей напряжения для заряда-разряда корабель-

ных АКБ большой емкости регулируемым реверсивным постоянным током при проведении формовочных циклов заряда-разряда от источника ДД-ВИГ мощностью 1320 кВт.

Принцип работы АЗРЭТК представлен на рис. 6, где приняты следующие условные обозначения:

ДД-ВИГ – дизельный двигатель – вентильно-индукторный генератор;

БТ – блок силовых IGBT-ключей;

ИТ – импульсный трансформатор;

ВУ – выпрямитель устройства;

БФ – блок фильтра;

НУ – нагрузочное устройство;

АКБ – аккумуляторные батареи;

DC/AC – инвертор, преобразующий постоянный ток в переменный трехфазный ток, сеть переменного тока частотой 3~50 Гц напряжением 380 В.

ДД и ВИГ соединены коаксиально. Энергия вращения передается от вала ротора на электрический генератор, от которого выработанная электроэнергия поступает через блок силовых IGBT-ключей, проходит через импульсный трансформатор, выпрямитель, блок фильтра и осуществляет заряд АКБ. Ток разряда и напряжение аккумуляторной батареи в инверторе преобразуется в необходимое для использования переменное напряжение, соответствующее стандартам 380 В / 50 Гц [4, 6].

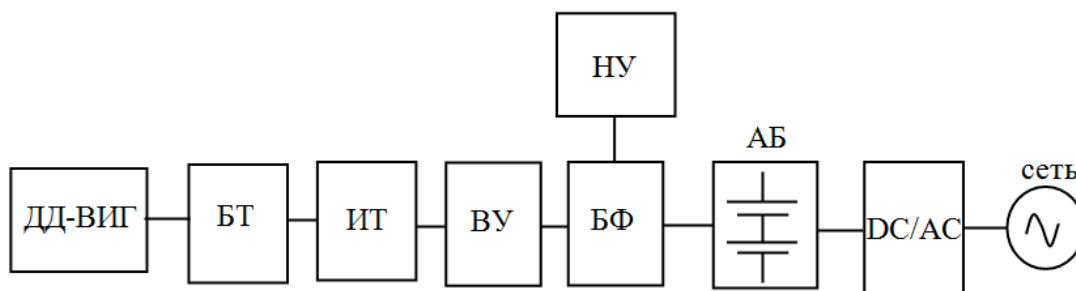


Рис. 6. Структурная схема блока АЗРЭТК

Fig. 6. Block diagram of the autonomous charge-discharge electrotechnical complex unit

Функциональная схема блока АЗРЭТК

Блок рекуперации (БР), функциональная схема которого представлена на рис. 7, предназначен для разряда АКБ. Особенностью данного блока является возможность возврата энергии АКБ в сеть

или ее передачу на нагрузочное устройство. В качестве управляющего микропроцессорного контроллера используется TMS320x24xx [9].

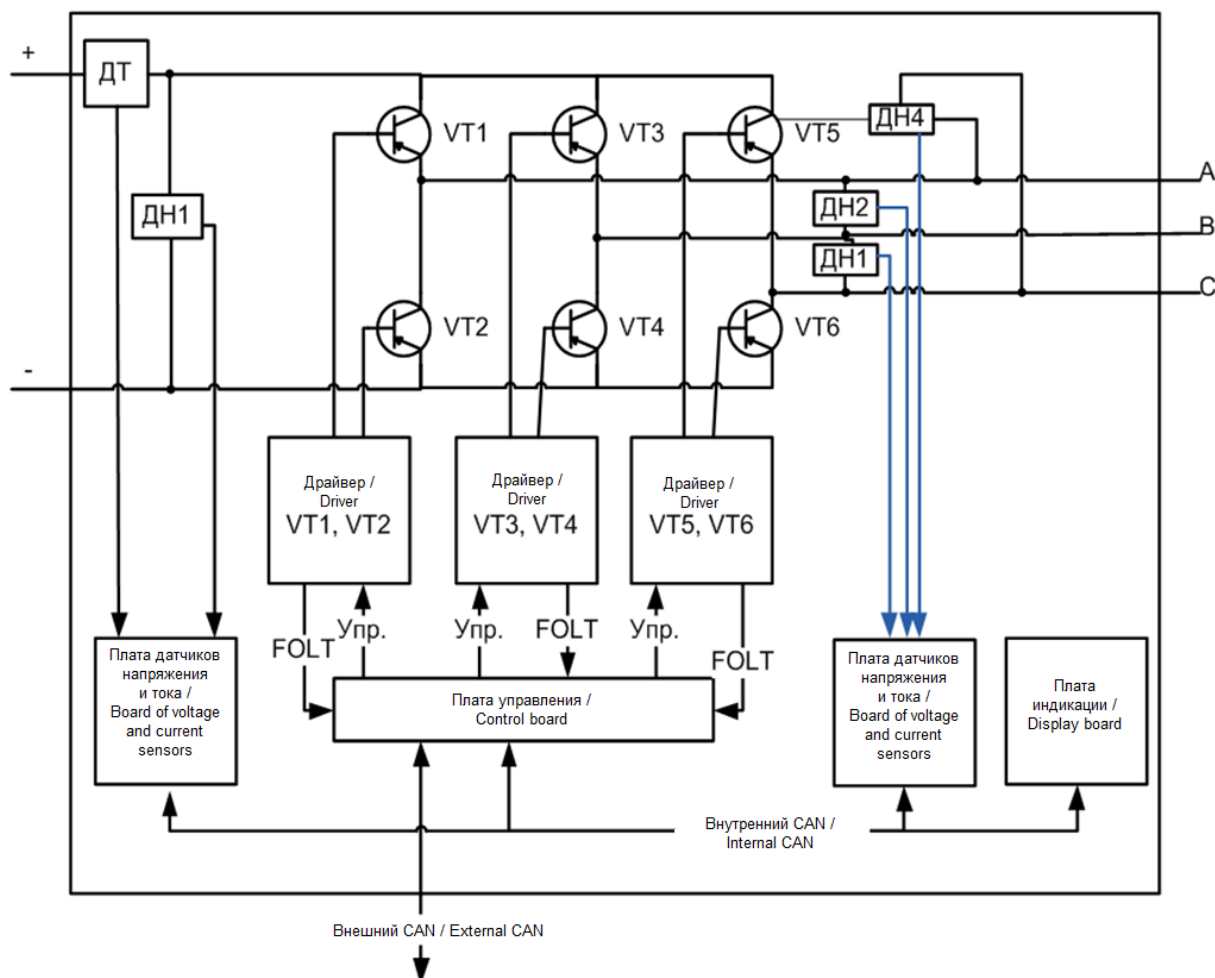


Рис. 7. Функциональная схема блока рекуперации

Fig. 7. Functional block diagram of the recovery unit



При разряде ШИМ-управление подает сигналы в сеть платы управления со встроенным микропроцессорным контроллером на транзисторы (VT1; VT2; VT3; VT4; VT5; VT6) и через драйверы формирует на выходе трехфазную синусоиду тока. Изменением величины амплитуды синусоиды происходит регулирование тока разряда АКБ.

При разряде на нагрузочное устройство сигналы ШИМ-управления подаются только на транзисторы VT1, VT3, VT5, а транзисторы VT2, VT4, VT6 должны быть закрыты. Шириной импульса ШИМ-управления регулируется ток разряда. Для предупреждения глубокого разряда на входе блока измеряется напряжение, и если оно приближается к значению 1,8 В на аккумулятор, то необходимо выдать соответствующее предупреждение на экран шкафа ЭВМ.

Плата датчиков напряжения измеряет напряжение на выходе БР для отслеживания перехода фазы через ноль и ее автоматической синхронизации с сетью. Платы датчиков напряжения и тока измеряют ток разряда АКБ и напряжение на входе и конструктивно одинаковы. Измеренные значения напряжений и токов передаются на плату управления по шине

CAN. Каждая из плат имеет два внешних двухканальных АЦП, по которым она получает данные от датчиков тока и напряжения. Предполагаемый график заряда представлен на рис. 8, напряжение переключения между ступенями составляет около 300 В.

Таким образом, можно предположить, что устройство должно обеспечивать: ток заряда 3600 А – до напряжения АКБ 300 В; 1800 А – до 300 В; 900 А – до 300 В; 400 А – до 320 В.

На рис. 9 представлена математическая модель АЗРЭТК в программе Matlab Simulink [10, 11].

Ток на выходе генератора [5] через блок силовых IGBT-ключей и импульсный трансформатор Т проходит фильтр LC и осуществляет заряд АКБ. Сигналы, поданные на блок Scope1, показаны на рис. 10. При разряде: фильтрованное напряжение постоянного тока прикладывается к инвертору IGBT, генерирующему напряжение частотой 50 Гц. Инвертор IGBT использует ШИМ, напряжение на выходе инвертора через фильтр поступает к измерению. Сигналы, поданные на блок Scope2, показаны на рис. 11. Здесь же показаны формы волн напряжения фаз, когда аккумуляторные батареи разряжаются в сеть.

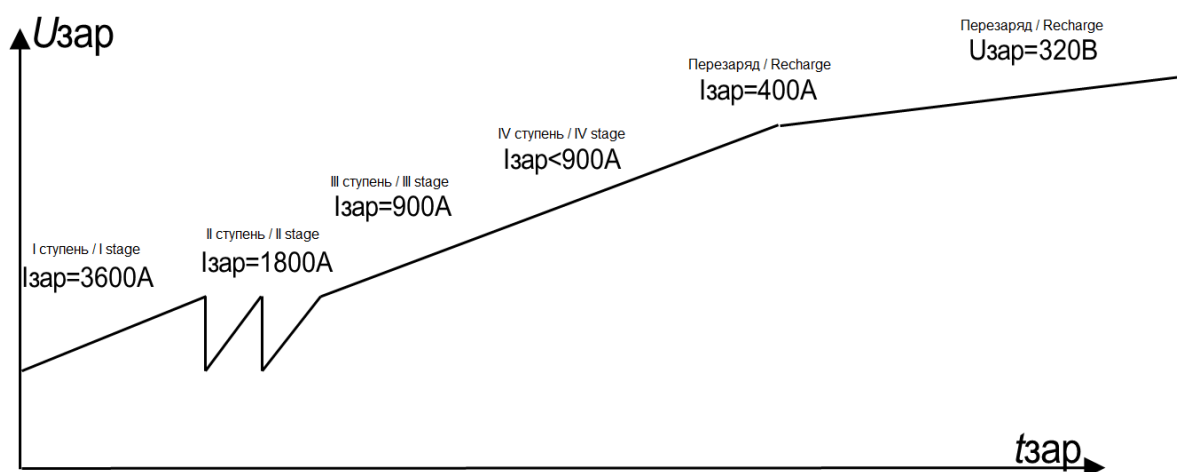


Рис. 8. График заряда батарей
Fig. 8. Battery charge schedule

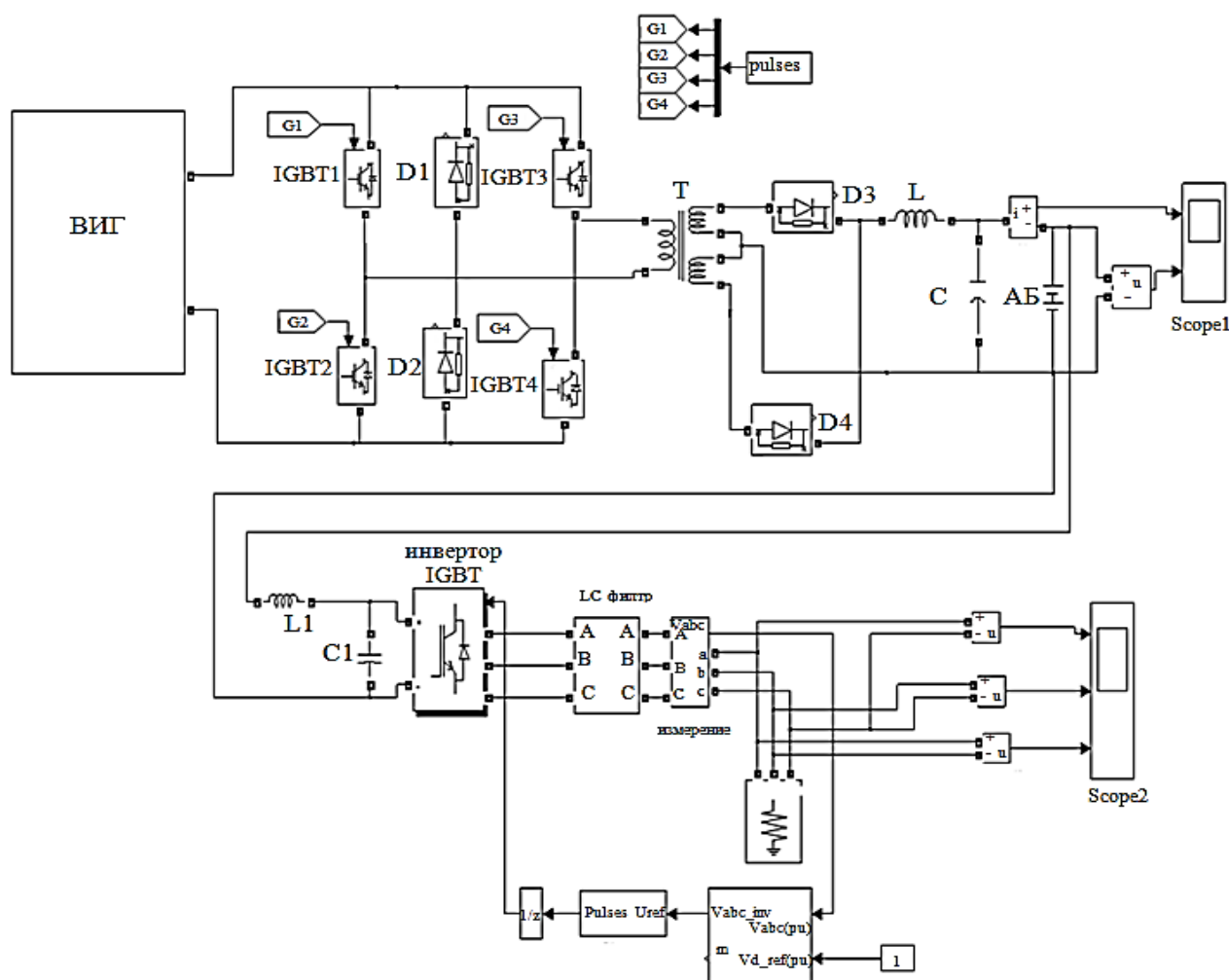


Рис. 9. Математическая модель АЗРЭТК при заряде/разряде

Fig. 9. Mathematical model of the autonomous charge-discharge electrotechnical complex at charge / discharge

Исходя из опыта в области построения автоматизированных систем, отметим важнейшие аспекты, связанные с реализацией систем контроля АКБ (СКД АКБ). Ранее в [12] была проведена отработка алгоритмов устройства контроля и экспериментальная проверка работоспособности его каналов измерения тока, напряжения, температуры, уровня электролита на стенде ЗАО «Электротяга» (г. Санкт-Петербург). Целью указанной проверки являлось изучение поведения и идентификация параметров АЗРЭТК и АКБ при различных режимах работы, с подтверждением и уточнением математического аппарата обработки данных, применяемого на верхнем уровне ЭВМ СКД АКБ⁴ [13–17].

Приведем основные пункты программы: проверка канала измерения тока АКБ; проверка канала контроля напряжения.

В ходе эксперимента были получены результаты, часть которых приведена на рис. 12–21. Проанализируем полученные данные. На рис. 12 приведена осциллограмма напряжения на клеммах аккумулятора в режиме заряда при токе 400 А. Очевидно, наличие пульсаций напряжения на аккумуляторе (из-за неоптимального режима работы зарядного устройства) не оказывает влияния на канал измерения напряжения за счет использования входных интегрирующих цепей. Однако применение этих цепей в канале тока не дает желаемого сглаживания пульсаций на рис. 13.

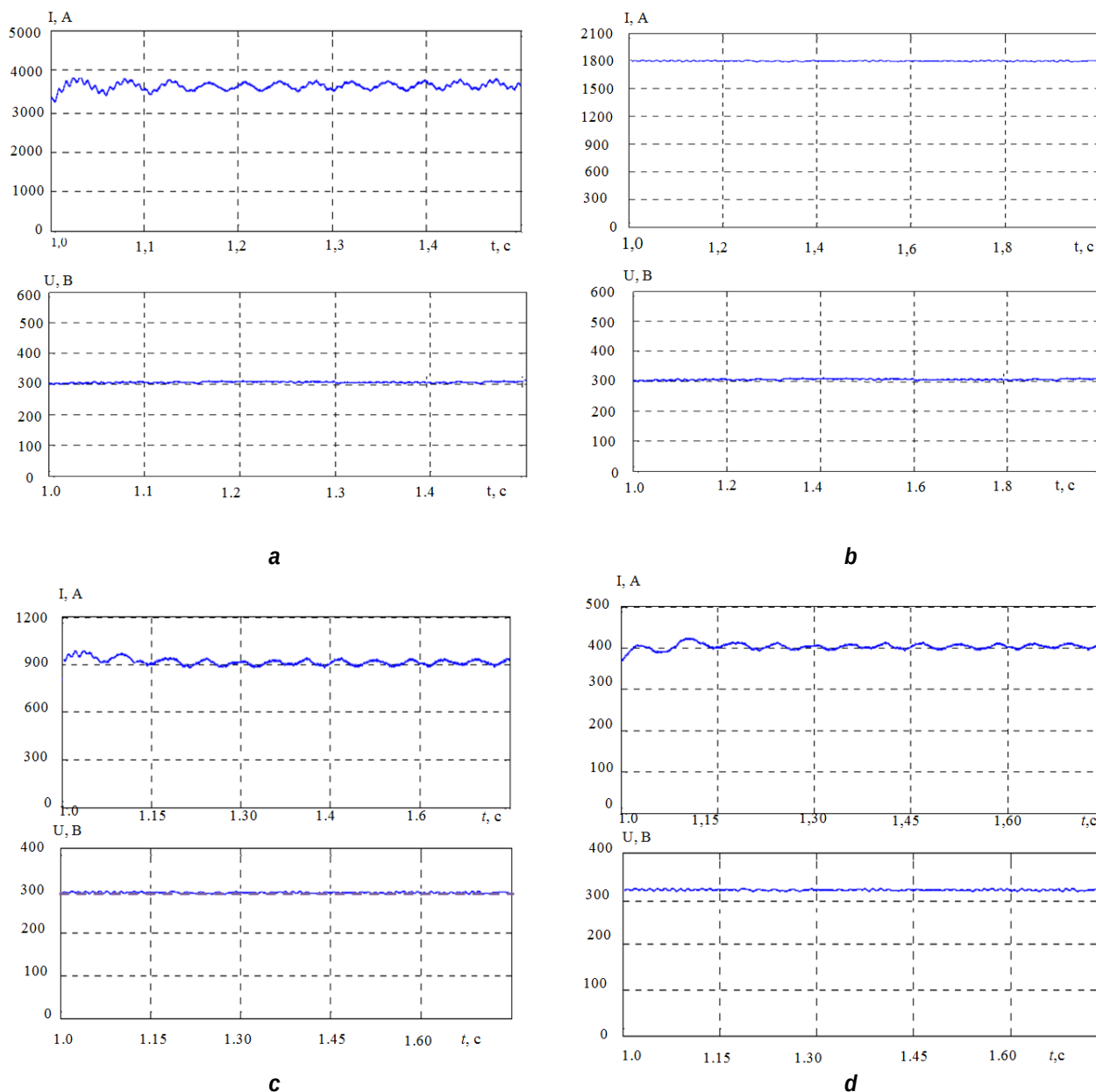


Рис. 10. Результаты моделирования тока и напряжения по ступени заряда:

a – ступень $I_{зар} = 3600$ A, $U = 300$ В; b – II ступень $I_{зар} = 1800$ A, $U = 300$ В;

c – III ступень $I_{зар} = 900$ A, $U = 300$ В; d – IV ступень $I_{зар} = 400$ A, $U = 320$ В

Fig. 10. Results of current and voltage simulation by the charge stage:

a – I stage $I_{charge} = 3600$ A, $U = 300$ V; b – II stage $I_{charge} = 1800$ A, $U = 300$ V;

c – III stage $I_{charge} = 900$ A, $U = 300$ V; d – IV stage $I_{charge} = 400$ A, $U = 320$ V

Использование интегрирующих цепей с большими постоянными времени приводит к снижению точности измерения, ввиду чего эта задача была решена программно, и учтена в АЗРЭТК, путем уменьшения дискретизации измерения по величине и по времени с применением интегрирующих уравнений.

Ввиду того что режим разряда АКБ организован с помощью применения инвертора (с отдачей энергии обратно в сеть), на осциллограмме напряжения аккумулятора также присутствуют пики высокочастотных помех (рис. 14). Очевидно, что в канале измерения напряжения (вход АЦП) эти высокочастотные составляющие отсутствуют (рис. 15).

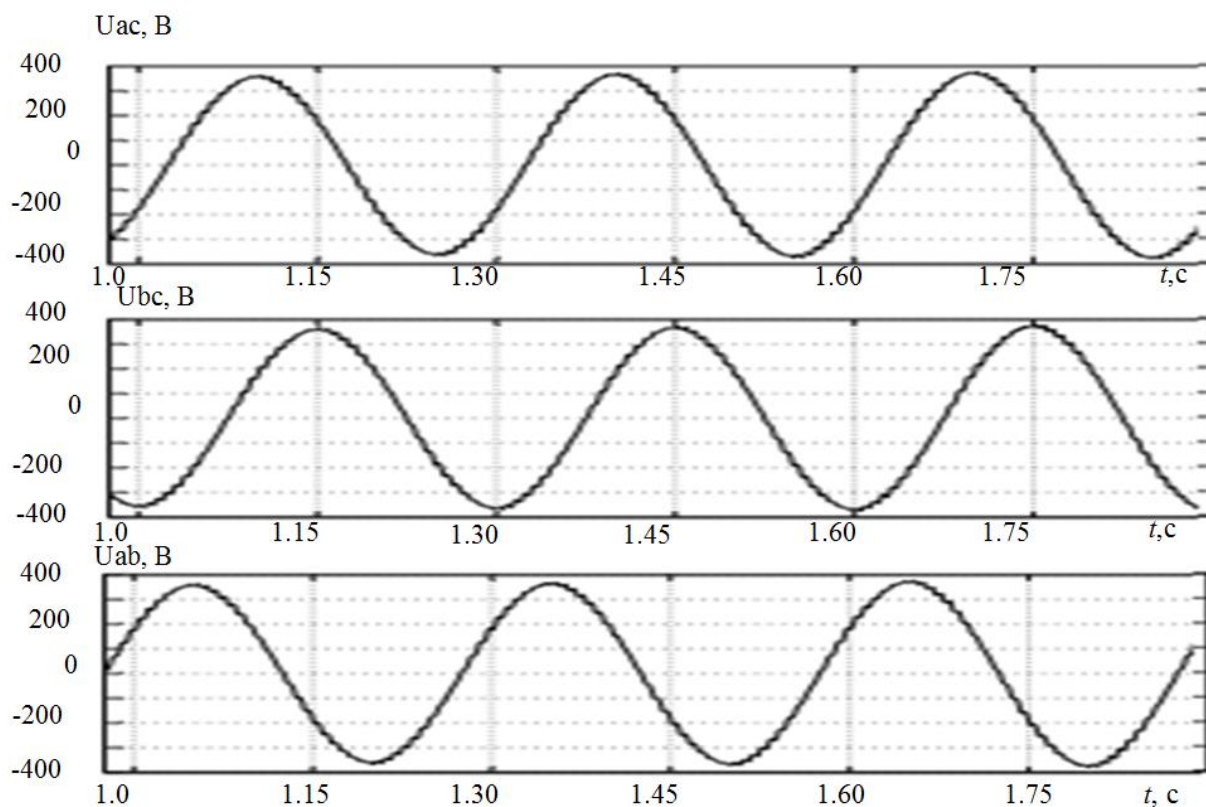


Рис. 11. Результаты моделирования напряжения при разряде АКБ в сеть переменного тока
Fig. 11. Voltage simulation results under storage battery discharge into the AC main

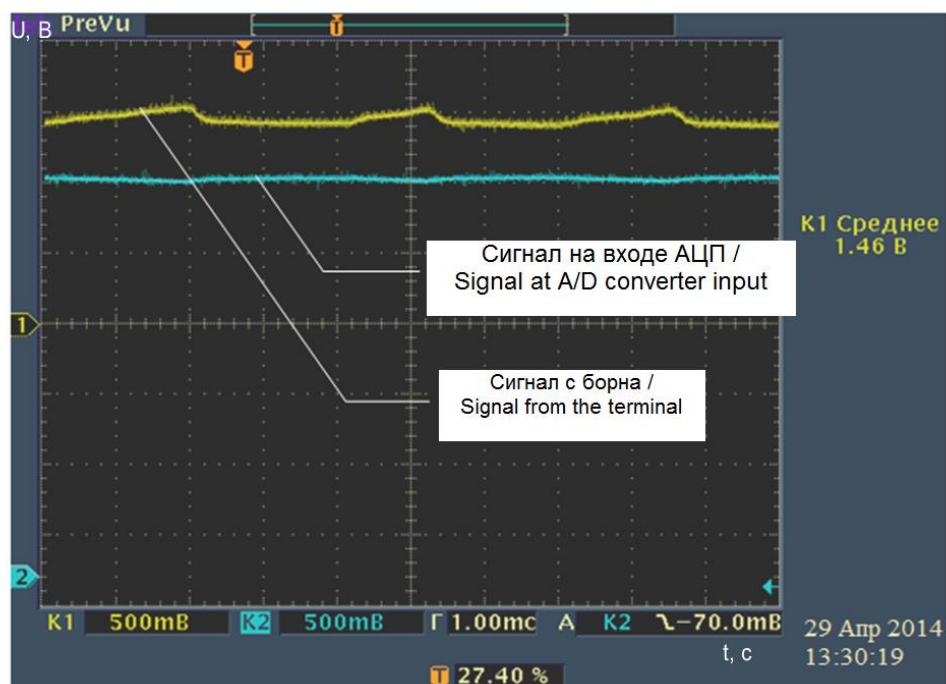


Рис. 12. Осциллограмма напряжения на борне при токе заряда 400 А
Fig. 12. Voltage oscillogram on the terminal at the charge current of 400 A

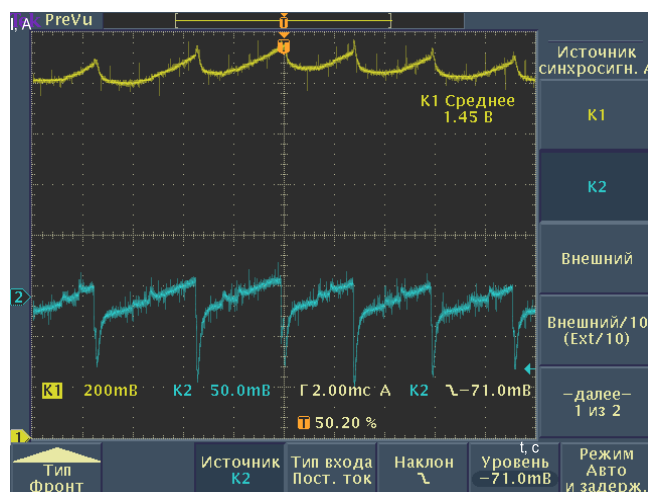


Рис. 13. Осциллограмма тока при заряде 400 А
Fig. 13. Current oscillogram at the charge of 400 A

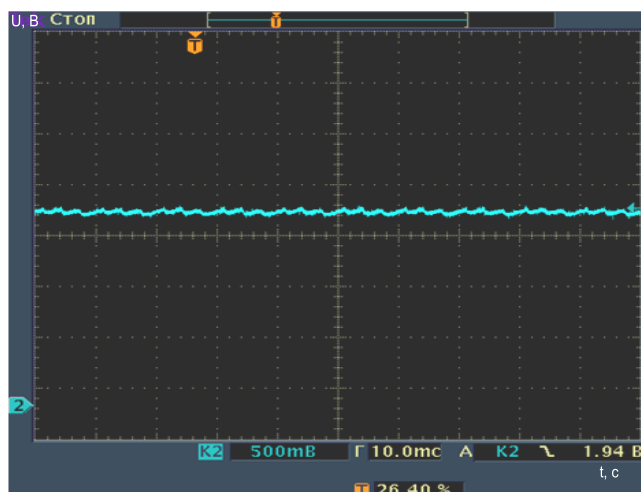


Рис. 14. Осциллограмма напряжения на борне при трехчасовом разряде током 1700 А
Fig. 14. Voltage oscillogram on the terminal under the three-hour discharge by the current of 1700 A

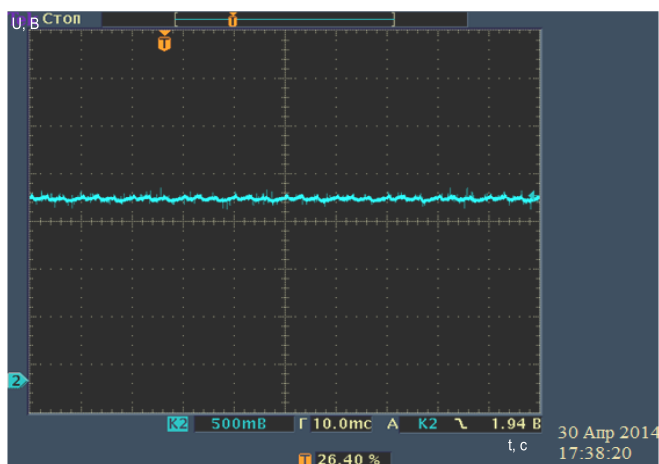


Рис. 15. Осциллограмма напряжения на входе АЦП с борна при трехчасовом разряде током 1700 А
Fig. 15. Voltage oscillogram at A/D converter input from the terminal with a three-hour discharge by the current of 1700 A



На рис. 16 приведены характеристики емкости АКБ в реальном времени при заряде токами 3600; 1800; 900; 400 А. Эти данные были получены из энергонезависимой памяти устройства контроля параметров аккумулятора (УКПА).

На рис. 17 показаны характеристики плотности электролита АКБ в масштабе

реального времени. Погрешность определения расчетной плотности (1) составляет 1,18%, экспериментальной (2) – 6,8%.

На рис. 18 приведена зависимость напряжения при заряде токами, А: I ступень – ток 3600; II – 1800; III – 900; IV – 400. На рис. 19 приведена зависимость напряжения при разряде током 400 А.

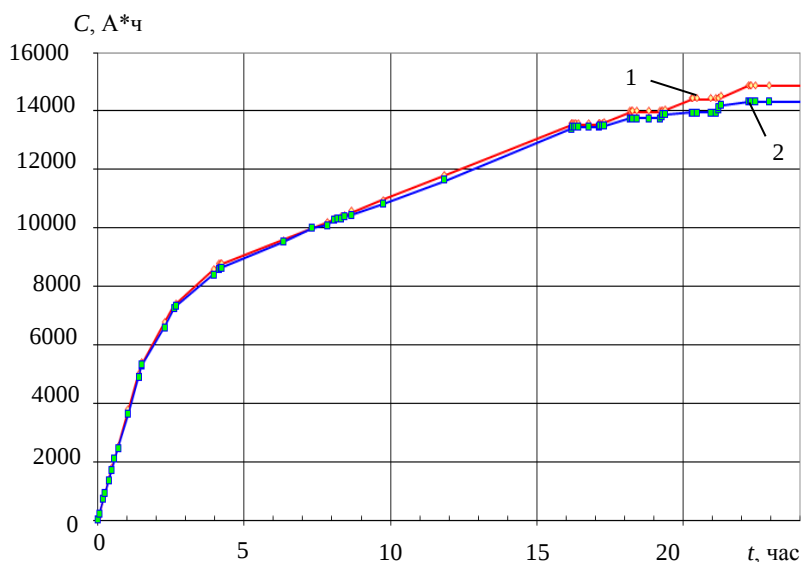


Рис. 16. Емкость АКБ в реальном времени при заряде токами 3600; 1800; 900 и 400 А, где 1 – емкость УКПА; 2 – экспериментальная емкость

Fig. 16. Storage battery capacity in real time with the charge by the currents of 3600; 1800; 900 and 400 A where: 1 – battery parameter monitoring device capacity; 2 – experimental capacity

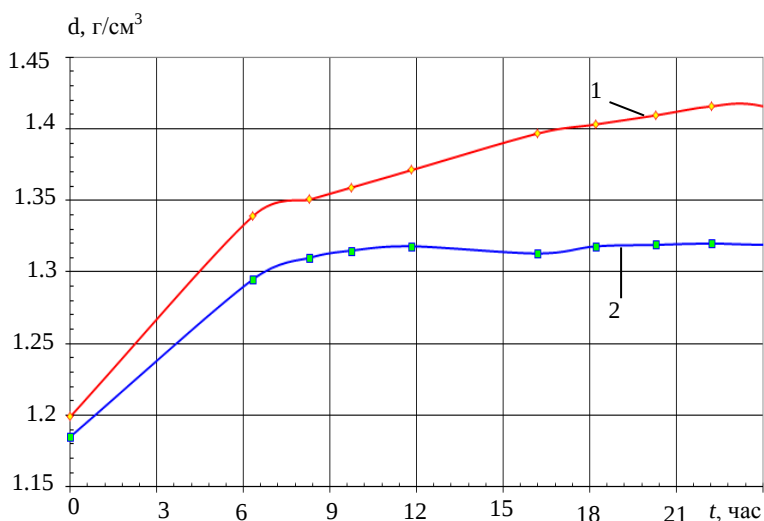


Рис. 17. Плотность электролита при заряде токами 3600; 1800; 900 и 400 А, где 1 – плотность расчетная; 2 – плотность экспериментальная

Fig. 17. Electrolyte density at the charge by the currents of 3600; 1800; 900 and 400 A, where: 1 – reference density; 2 – experimental density

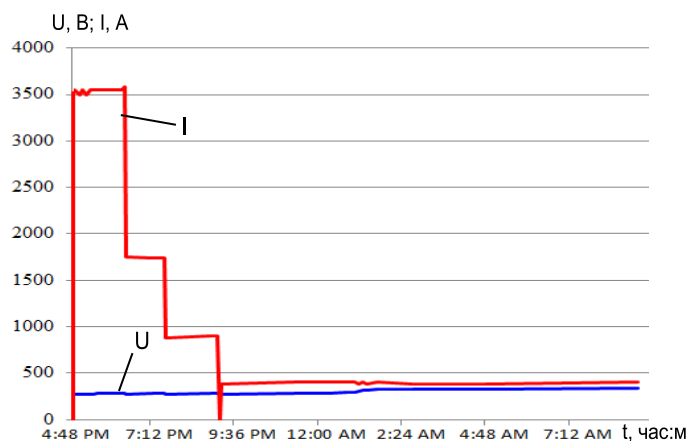


Рис. 18. Зависимость напряжения при заряде токами 3600; 1800; 900 и 400 А
Fig. 18. Voltage dependence at the charge by the currents of 3600; 1800; 900 and 400 A

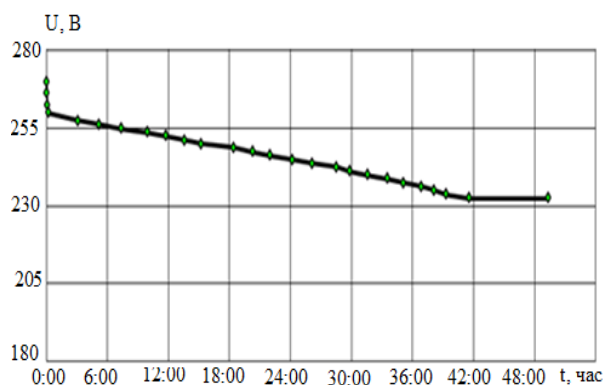


Рис. 19. Зависимость напряжения при разряде током 400 А
Fig. 19. Voltage dependence at the discharge by the current of 400 A

На рис. 20 показана зависимость напряжения в масштабе реального времени при заряде токами 3600; 1800; 900 и

400 А. Погрешность определения экспериментального напряжения составляет 0%, напряжения УКПА – 2,7%.

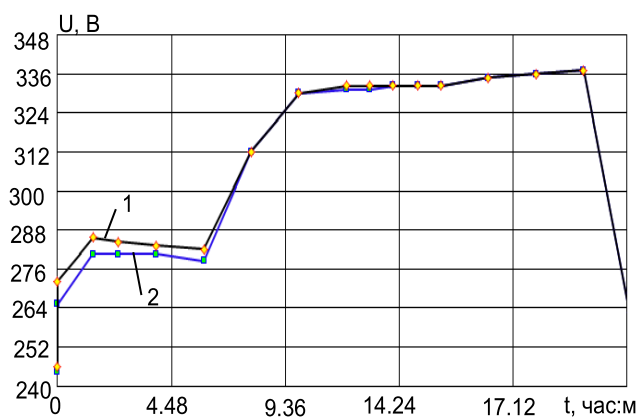


Рис. 20. Зависимость напряжения при заряде токами 3600; 1800; 900 и 400 А, где 1 – напряжение экспериментальное, 2 – напряжение УКПА
Fig. 20. Voltage dependence at the charge by the currents of 3600; 1800; 900 and 400 A, where: 1 – experimental voltage, 2 – battery parameter monitoring device voltage



На рис. 21 показана зависимость тока в масштабе реального времени при заряде токами 3600; 1800; 900 и 400 А. Погрешность определения измеренного тока составляет 2,74%, заданного тока – 1,25%,

что удовлетворяет требованиям: точность поддержания тока и напряжения на выходе в режиме заряд/разряд должна быть в пределах $\pm 3\%$.

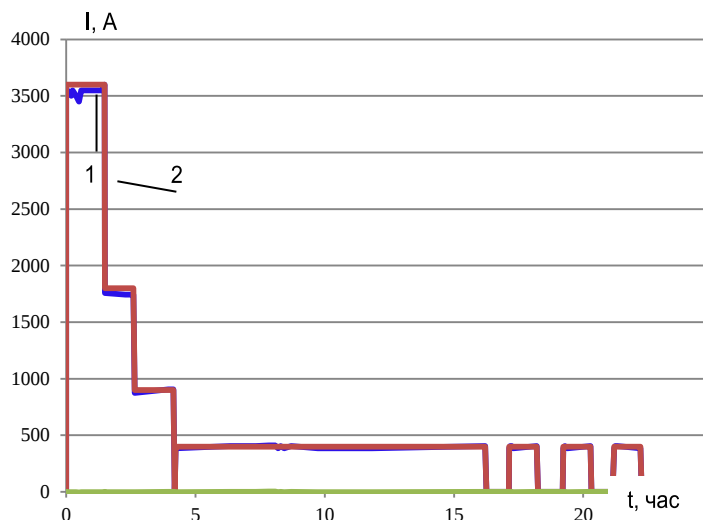


Рис. 21. Ток в реальном масштабе времени при заряде 3600; 1800; 900 и 400 А, где 1 – ток измеренный, 2 – ток заданный

Fig. 21. Current in real time scale with the charge of 3600; 1800; 900 and 400 A, where: 1 – measured current, 2 – set current

Выводы

Одним из возможных путей технического совершенствования автономных зарядно – разрядных электротехнических комплексов аккумуляторных батарей подводных аппаратов, является использование предложенного в работе модернизированного АЗРЭТК, обеспечивающего полную автономность и независимость от стационарной сети напряжением 6–10 кВ за счет применения дизель-генератора с вентиляно-индукторной машиной.

Исследования функциональных возможностей АЗРЭТК на математической модели и экспериментальные исследования на реальных установках от источника ДД–ВИГ мощностью 1320 кВт, показали существенное расширение функциональных возможностей данного АЗРЭТК, при достижении максимально возможной экономии энергии, затрачиваемой в процессе неоднократных циклов заряда-разряда ко-

рабельных аккумуляторных батарей большой емкости.

Использование в АЗРЭТК автоматизированной системы контроля и диагностики АКБ предоставляет широкие функциональные возможности и повышение достоверности результатов контроля и диагностирования за счет охвата комплексной проверкой в реальном масштабе времени всех аккумуляторов по напряжению на банке, выделенной части аккумуляторов по ЭДС, уровню и температуре электролита, по напряжению АКБ в целом, по току нагрузки и току заряда АКБ, дополненной расчетом значений плотности электролита в масштабе реального времени, сопротивления изоляции, емкости, времени до окончания разряда АКБ, прогнозом остаточного ресурса и срока службы АКБ и т.д. и в связи с автоматизацией процесса эксплуатации АКБ в целом.



Библиографический список

1. Устройства зарядные серии УЗА [Электронный ресурс] // Преобразовательная техника. Зарядные и зарядно-разрядные устройства. ПАО «Электровыпрямитель». URL: <http://www.elvpr.ru/preobraz-technic/zaryadpusk/uza.php> (17.01.2018).
2. Пат. 89296 РФ, МПК: H02J7/00. Автоматизированная высокопроизводительная система зарядки-разрядки аккумуляторных батарей / Н.А. Иванов, В.И. Красов, О.В. Куличенко, А.Н. Лебедев, В.Т. Николаенко и др., 2009.
3. Пат. 122212 РФ, МПК: H02J7/32. Автономная электростанция / Ю.П. Стоянов, В.В. Зенин, Д.П. Колесников. 2006.
4. Пат. № 2595267. Мобильный зарядно-разрядный комплекс для корабельных аккумуляторных батарей // Фам Конг Тао., А.П. Темирёв, А.А. Цветков, В.И. Киселев и др. 2016.
5. Фам Конг Тао, Фам Ван Вьен, Нгуен Фыонг Ти, Абакумов М.И. Разработка дизельного двигателя-вентильно-индукторного генератора для мобильного зарядно-разрядного комплекса // Успехи современной науки. 2017. Т. 5. № 4. С. 104–111.
6. Пат. № 2377157. Электроэнергетическая система перспективных дизель-электрических подводных лодок с мониторингом состояния аккумуляторных батарей / К.С. Ляпидов, А.В. Анисимов, А.П. Темирёв и др. 2009.
7. Пат. 2419943 РФ. Зарядно-разрядный береговой комплекс для корабельных аккумуляторных батарей с электропитанием от высоковольтной сети / В.М. Павлюков, А.Н. Юдин, А.В. Кротенко, В.К. Куликов, А.П. Темирёв и др. 2010.
8. Пат. 2106679 РФ, МПК G 05 В 23/02. Зарядно-разрядное устройство с рекуперацией электроэнергии в корабельную сеть / И.В. Капустин, И.В. Киселев, Б.В. Никуфоров, А.П. Прасолин, А.П. Темирёв. 2013. Бюл. 31.
9. Темирёв А.П., Козаченко В.Ф., Обухов Н.А., Алучин А.С., Нукифоров Б.В., Трофимов С.А., Байков В.П. Контроллеры МК 11.3 для высокопроизводительных систем прямого цифрового управления двигателями // CHIP NEWS. 2002. № 4 (67). С. 24–30.
10. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPower Systems и Simulink. М.: ДМК-Пресс, 2007. 288 с.
11. Лурье М.С., Лурье О.М. Имитационное моделирование схем преобразовательной техники. Красноярск: Изд-во СГТУ, 2007. 145 с.
12. Темирёв А.П. Совершенствование комплекса устройств релейной защиты, автоматики и диагностики судовых электроэнергетических систем: монография. Ростов н/Д: Изд-во Ростовского университета, 2005. 150 с.
13. Пат. № 2474832. Автоматизированная система контроля и диагностики аккумуляторных батарей корабельного базирования / А.П. Темирёв, В.И. Киселев, А.В. Кротенко и др. 2013.
14. Ясаков Г.С. Корабельные электроэнергетические системы. СПб.: Военно-морская академия им. Н.Г. Кузнецова, 1999. 640 с.
15. Пат. 89296 РФ, МПК: H02J7/00. Автоматизированная высокопроизводительная система зарядки-разрядки аккумуляторных батарей / Н.А. Иванов, В.И. Красов, О.В. Куличенко, А.Н. Лебедев, В.Т. Николаенко. и др. 2009.
16. Абрамов В.И., Соколов А.А., Тютрюмов О.С. Анализ сроков службы аккумуляторных батарей в эксплуатации. Автотракторное электрооборудование: науч.-техн. реф. сб. М.: Изд-во НИИНавтопром. 1974. № 8. С. 18–22.
17. Бабаев А.И. Стартерные свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. М.: Воениздат, 1967. 173 с.

References

1. *Ustroistva zaryadnye serii UZA. Preobrazovatel'naya tekhnika. Zaryadnye i zaryadno-razryadnye utroistva* [Charging devices of the UZA series. Conversion devices. Charging and charge-discharge devices]. Available at: <http://www.elvpr.ru/preobraz-technic/zaryadpusk/uza.php> (accessed 17 January 2018).
2. Ivanov N.A., Krasov V.I., Kulichenko O.V., Lebedev A.N., Nikolaenko V.T. [et al.]. *Avtomatizirovannaya sil'notochnaya sistema zaryadki-razryadki akkumulyatornykh batarei* [Automated high-current charge-discharge system of accumulator batteries]. Patent RF, no. 89296, 2009.
3. Stoyanov Yu.P., Zenin V.V., Kolesnikov D.P. *Avtonomnaya elektrostantsiya* [Stand-by power station]. Patent RF, 122212 RF, 2006.
4. Fam Kong Tao, Temirev A.P., Tsvetkov A.A., Kiselev V.I. [et al.]. *Mobil'nyi zaryadno-razryadnyi kompleks dlya korabel'nykh akkumulyatornykh batarei* [Mobile charge-discharge system for shipboard accumulator batteries]. Patent RF, no. 2595267, 2016.
5. Fam Kong Tao, Fam Van V'en, Nguen Fyong Ti, Abakumov M.I. Development of the diesel engine switched reluctance generator for mobile charge-discharge complex. *Uspekhi sovremennoi nauki* [Modern Science Success]. 2017, vol. 5, no. 4, pp. 104–111. (In Russian).
6. Lyapidov K.S., Anisimov A.V., Temirev A.P. [et al.]. *Elektroenergeticheskaya sistema perspektivnykh dizel'-elektricheskikh podvodnykh lodok s monitoringom sostoyaniya akkumulyatornykh batarei* [Electric power system of promising diesel-electric submarines with storage battery state monitoring]. Patent RF, no. 2377157, 2009.
7. Pavlyukov V.M., Yudin A.N., Krotenko A.V., Kulikov V.K., Temirev A.P. [et al.]. *Zaryadno-razryadnyi*



beregovoi kompleks dlya korabel'nykh akkumulyatornykh batarei s elektropitaniem ot vysokovol'tnoi seti [Charge-discharge coastal complex for shipboard storage batteries supplied from a high-voltage network]. Patent RF, no. 2419943, 2010.

8. Kapustin I.V., Kiselev I.V., Nikiforov B.V., Prasolin A.P., Temirev A.P. *Zaryadno-razryadnoe ustroystvo s rekuperatsiei elektroenergii v korabel'nyu set'* [Charge-discharge device with electric energy recovery into the ship's network]. Patent RF, no. 2106679, 2013.

9. Temirev A.P., Kozachenko V.F., Obukhov N.A., Aluchin A.S., Nukiforov B.V., Trofimov S.A., Baikov V.P. MK 11.3 controllers for high-performance systems of engine direct digital control. CHIP NEWS. 2002, no. 4 (67), pp. 24–30.

10. Chernykh I.V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPower Systems i Simulink* [Modeling of electrical devices in MATLAB, SimPower Systems and Simulink]. Moscow: DMK-Press Publ., 2007, 288 p. (In Russian).

11. Lur'e M.S., Lur'e O.M. *Imitatsionnoe modelirovanie skhem preobrazovatel'noi tekhniki* [Simulation modeling of conversion device circuits]. Krasnoyarsk: Sibirskii gosudarstvennyi tekhnologicheskii universitet Publ., 2007, 145 p. (In Russian).

12. Temirev A.P. *Sovershenstvovanie kompleksa ustroystv releinoi zashchity, avtomatiki i diagnostiki sudovykh elektroenergeticheskikh sistem* [Improvement of the complex of devices of relay protection, automatics and diagnostics of shipboard electric power systems].

Rostov na Donu: Rostovskii gosudarstvennyi universitet Publ., 2005, 150 p. (In Russian).

13. Temirev A.P., Kiselev V.I., Krotenko A.V. [et al.]. *Avtomatizirovannaya sistema kontrolya i diagnostiki akkumulyatornykh batarei korabel'nogo bazirovaniya* [Automated system for control and diagnostics of ship-based storage batteries]. Patent RF, no. 2474832, 2013.

14. Yasakov G.S. *Korabel'nye elektroenergeticheskie sistemy* [Shipboard power systems]. Saint-Petersburg: N.G. Kuznetsov Naval Academy Publ., 1999, 640 p. (In Russian).

15. Ivanov N.A., Krasov V.I., Kulichenko O.V., Lebedev A.N., Nikolaenko V.T. [et al.]. *Avtomatizirovannaya sil'notochnaya sistema zaryadki-razryadki akkumulyatornykh batarei* [Automated high-current battery charge/discharge system]. Patent RF, no. 89296, 2009.

16. Abramov V.I., Sokolov A.A., Tyutryumov O.S. *Analiz srokov sluzhby akkumulyatornykh batarei v ekspluatatsii. Avtotraktornoe elektrooborudovanie: nauchno-tekhnicheskii referativnyi sbornik* [Analysis of the service life of storage batteries in operation. Motor and tractor electrical equipment: scientific and technical reports]. Moscow: Scientific Research Institute of Automobile Industry Publ., 1974, no. 8, pp. 18–22. (In Russian).

17. Babaev A.I. *Starternye svintsovo-kislotnye akkumulyatornye batarei* [Starter lead-acid storage batteries]. Moscow: Voenizdat Publ., 1967, 173 p. (In Russian).

Критерии авторства

Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.184

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-172-182>

ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ТОЧКИ РОСЫ В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ ВЫСОКОСЕРНИСТЫХ УГЛЕЙ И ИХ СМЕСЕЙ

© А.Н. Кудряшов¹, Р.Р. Байбурун², Ю.Д. Бибикова³

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬЮ исследования являлось определение точки росы в дымовых газах высокосернистых углей в процессе их сжигания на котлоагрегатах. **МЕТОДЫ.** Проведены опытно-промышленные испытания на котлоагрегатах Ново-Зиминской ТЭЦ с использованием приборов визуального контроля и расчетных характеристик. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Исследовано влияние изменения точки росы в дымовых газах высокосернистых углей и их смесей на работу котельных агрегатов БКЗ-420-140 Ново-Зиминской ТЭЦ. Приведены основные технические характеристики топлива. Дана методика проведения испытаний и обработки полученных результатов, на основании которых построена зависимость концентрации SO_2 от содержания серы в топливе. Определена формула для расчета содержания SO_2 в дымовых газах в зависимости от содержания серы в топливе. **ВЫВОДЫ.** Для угля Азейского месторождения определена зависимость приведенного содержания серы в топливе от содержания в нем серы на рабочую массу. Установлено, что содержание выбросов оксидов серы в дымовых газах в значительной степени зависит от содержания серы в топливе на рабочую массу. Определены зависимости концентрации SO_2 в дымовых газах для угля с содержанием серы на рабочую массу в пределах от 0,5 до 1,9% от температуры точки росы, приведенной к коэффициенту избытка воздуха в уходящих газах.

Ключевые слова: котлоагрегат, бурый уголь, рабочая масса топлива, коэффициент избытка воздуха, оксиды серы, низкотемпературная коррозия, шлакование, температура точки росы, дымовые газы, паропроизводительность, минеральная часть золы, выбросы вредных веществ.

Информация о статье. Дата поступления 22 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 15 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Кудряшов А.Н., Байбурун Р.Р., Бибикова Ю.Д. Оценка изменения точки росы в дымовых газах высокосернистых углей и их смесей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 172–182. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-172-182

ESTIMATION OF DEW POINT CHANGE IN THE FLUE GASES OF HIGH-SULFUR COALS AND THEIR MIXTURES

A.N. Kudryashov, R.R. Baiburin, Yu.D. Bibikova

National Research Irkutsk State Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the study is to determine the dew point in the flue gases of high-sulfur coals under their combustion in boiler units. **METHODS.** Pilot tests have been carried out on Novo-Ziminskaya CHPP boilers with the use of visual control devices and design characteristics. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The effect of the dew point alteration in the flue gases of high-sulfur coals and their mixtures on the operation of Novo-Ziminskaya CHPP boiler units BKZ-420-140 is studied. The main technical characteristics of the fuel are described. The technique of testing and pro-

¹Кудряшов Александр Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры теплоэнергетики Института энергетики, e-mail: kan@istu.irk.ru

Alexander N. Kudryashov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Heat Power Engineering of the Institute of Power Engineering, e-mail: kan@istu.irk.ru

²Байбурун Роман Радикович, магистрант Института энергетики, e-mail: baiburin.rr@gmail.com

Roman R. Baiburin, Master's degree student of the Institute of Power Engineering, e-mail: baiburin.rr@gmail.com

³Бибикова Юлия Дмитриевна, студентка Института архитектуры, строительства и дизайна, e-mail: ubibikova@rambler.ru

Yulia D. Bibikova, Student of the Institute of Architecture, Construction and Design, e-mail: ubibikova@rambler.ru



cessing of the obtained results is given. Based on the data obtained the dependence of SO_2 concentration on fuel sulfur content is constructed. The formula for the calculation of SO_2 content in flue gases depending on the sulfur content in fuel is determined. **CONCLUSIONS.** The dependence of the reduced sulfur content in fuel on its as-fired fuel sulfur content has been determined for the Azey coal. The content of sulfur oxide emissions in flue gases is strongly dependent on the as-fired fuel sulfur content. The dependences of SO_2 concentration in flue gases for the coal with the as-fired fuel sulfur content in the range from 0.5 to 1.9% on the dew point temperature reduced to the excess air factor in the flue gases have been determined.

Keywords: boiler (unit), brown coal, as-fired fuel, air excess ratio, sulfur oxides, low-temperature corrosion, slagging, dew-point temperature, flue gases, steaming capacity, mineral part of ash, emissions of harmful substances

Information about the article. Received February 22, 2018; accepted for publication March 15, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Kudryashov A.N., Baiburin R.R., Bibikova Yu.D. Estimation of dew point change in the flue gases of high-sulfur coals and their mixtures. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018. vol. 22, no. 3, pp. 172–182. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-172-182

Введение

В настоящее время сформировалась устойчивая тенденция ухудшения качества поставляемого топлива. Перед тепловыми электрическими станциями (ТЭС) стоит непростая задача эффективного сжигания углей проектных марок с ухудшенными качественными характеристиками и не-проектных углей. Поэтому стало острой необходимостью определение условий, при которых использование на ТЭС этих углей может быть экономически эффективным. Положительный экономический эффект в этом случае обеспечен меньшей стоимостью углей с пониженными качественными характеристиками, за счет чего должно быть компенсировано увеличение затрат при сжигании последних и потерь из-за снижения располагаемой мощности ТЭС⁴ [1–4].

К числу нежелательных примесей в угле относится сера, которая снижает потребительские качества угля, хотя при горении органической и пиритной ее составляющих выделяется энергия. К неблаго-

приятным последствиям использования высокосернистых углей относится ухудшение экологических показателей из-за создания проблем с выбросом вредных оксидов серы в атмосферу, возникновение или усиление высоко- и низкотемпературной коррозии, шлакование котлов и износ топливно-транспортного и пылеприготовительного оборудования^{5,6} [5].

В целом влияние различных соединений серы на работу оборудования не одинаково, и определяющим может быть не наличие серы, а свойства самих этих соединений. Такие негативные последствия, как шлакование котлов и эрозионный износ элементов топливоподдачи и пылеприготовления, зависят не от общего содержания серы, а от содержания пирита (пиритной серы). Все это определяет необходимость использования при анализе свойств топлива и его влияния на работу оборудования не только сведений о содержании серы в угле (сера общая S_t), но и ее разновидностях [6].

⁴Энергетическая стратегия России на период до 2030 года; утв. распоряжением Правительства РФ от 13.11.2009 г. № 1715-р. / Energy Strategy of Russia for the period up to 2030; approved by the Government Decree of 13 November 2009 N 1715-r.

⁵Григорьев К.А., Рундыгин Ю.А., Тринченко А.А. Технология сжигания энергетических топлив. Энергетические топлива: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. университета, 2006. 92 с. / Grigoriev K.A., Rundygin Yu.A., Trinchchenko A.A. Technology of burning energy fuels. Energy Fuels: Learning aids. Sankt-Peterburg: Publishing house of Polytechnic university, 2006, 92 p.

⁶Основы практической теории горения: учеб. пособие для вузов / под ред. В.В. Померанцева. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат, 1986. 312 с. / Bases of practical combustion theory: Textbook for universities / under edition of V.V. Pomerantseva. 2nd edition, Revised and enlarged. Leningrad: Energoatomizdat Publ., 1986, 312 p.



Существующая практика исследования углей в различных организациях, обслуживающих энергетику, сертификации поставляемых на ТЭС углей и отражаемых в материалах поставщиков сведений о качестве топлива, не предусматривает обязательного определения разновидностей серы. Сведения о разновидностях серы даются для высокосернистых углей и, как правило, отсутствуют для углей с низким содержанием серы, хотя при малой сернистости угля ее содержание в пересчете на золу, что более важно при рассмотрении проблем шлакования, для малозольных углей может быть высоким. Из сказанного следует, что разработка методов оценки

разновидностей серы по другим показателям целесообразна и актуальна.

Топливный баланс ПАО «Иркутск-энерго» на 100% состоит из углей компании «Востсибуголь». С прогнозируемым ухудшением качества углей предполагается рост ремонтно-эксплуатационных затрат и экологических платежей. В связи с этим была выполнена оценка изменения точки росы в дымовых газах высокосернистых углей, преимущественно Азейского месторождения, и их смесей в различных пропорциях при сжигании на котлах БКЗ-420-140 Ново-Зиминской ТЭЦ ПАО «Иркутск-энерго» (НЗТЭЦ).

Состав и характеристика углей

Азейское месторождение расположено по обе стороны Восточно-Сибирской железной дороги около г. Тулун. Площадь месторождения составляет 200 км², в том числе: детально разведанная – 103,5 км²; предварительно разведанная – 28,2 км². Общие запасы углей на месторождении оцениваются в 607,1 млн т, из них по категории А+В+С₁ – 557,0 млн т; по категории С₂ – 25,2 млн т; забалансовые – 24,9 млн т. Угольные пласты залегают почти горизонтально на глубину до 16 м, мощность пластов достигает 15 м.

Месторождение отрабатывается двумя разрезами – «Азейским» и «Тулунским». Разрез «Азейский», производственной мощностью 4,5 млн т угля в год, отрабатывает центральную и южную части Азейского бурогоугольного месторождения, расположенных между станциями Нюра и станцией Шерагул ВСЖД.

Разрез «Тулунский» расположен по другую сторону железной дороги от разреза «Азейский». Балансовые запасы по категории А+В+С₁ составляют 63,55 млн т, промышленные – 51 млн т. Проектная мощность разреза – 3 млн т угля в год. Добыча ведется на двух участках – «Южный» и «IV эксплуатационная площадь». По участку «Южный» отрабатывается два пласта: первый и второй мощностью 1,15–3,25 и 1,05–3,55 м соответственно.

Угли бурые марки ЗБ, среднезольные, малосернистые, на воздухе быстро рассыпаются в мелочь. Коэффициент размолоспособности Кло пластовых проб составляет 0,8; товарных – 1,1. Характеристики азейских углей по месторождению в целом составляют, %: влажность $W_t = 16-25$; зольность $A^d = 14,5$; выход летучих $V^{daf} = 46,8\%$; содержание углерода $C^{daf} = 72,2$; водорода $H^{daf} = 5,4$; серы $S_t^d = 0,5^{5,7,8}$.

⁷ГОСТ 25543-82. Угли бурые, каменные и антрациты. Классификация по генетическим и технологическим параметрам; утв. и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 06.06.1988 г. № 1273. /GOST 25543-82. Brown coals, bituminous coals and anthracites. Classification by genetic and technological parameters; approved and put into effect by the decision of the USSR State Committee on Standards of 6 June 1988 No. 1273.

⁸Тепловой расчет котлов (нормативный метод). 3-е изд., перераб. и доп. СПб: Изд-во НПО ЦКТИ, 1998. 256 с. / Thermal calculation of boilers (normative method). 3d edition, Revised and enlarged. St. Petersburg: Publishing house of the NGO CKTI, 1998. 256 p.



Азейские угли, поставляемые на ТЭЦ ПАО «Иркутскэнерго» в 2015–2017 гг., характеризовались следующими показателями, %: $W_t^f = 23,3$; $A^d = 21$; содержание серы $S_t^d = 1,3$; теплота сгорания $Q_{s, daf}^d = 30700\text{--}33180$ кДж/кг (7330–7920 ккал/кг).

Зола углей характеризуется повышенным содержанием кремнезема и глинозема, средними концентрациями железа и кальция и малыми – щелочей. Усреднен-

ный химический состав зольного остатка в целом по месторождению приведен в табл. 1.

По данным геологической разведки, значение общей серы с годами добычи будет увеличиваться и к 2018 г. по блокам может составить, %: по центральному – до 2,15; западному: до 1,77 – по пласту № 1; до 1,8 – по пласту № 2; по восточному блоку содержание серы может увеличиться от 1,5 до 4,0.

Таблица 1

**Химический состав и плавкостные характеристики зольного остатка угля
Азейского месторождения**

Table 1

**Chemical composition and fusibility characteristics of ash residual
of Azey coal**

Химический состав зольного остатка (на бессульфатную массу), % / Chemical composition of ash residual (per a non-sulphate weight), %								Плавкостные характеристики, °C / Fusibility characteristics, °C		
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	t _A	t _B	t _C
51,5	29,5	7,5	0,5	8,5	2,0	0,7	0,2	1230– 1290	1400– 1500	1420– 1500

Методика проведения испытаний и обработки результатов

Испытания по определению температуры точки росы продуктов горения топлива проводились на котлоагрегатах БКЗ-420-140 ст. № 3, 4 Ново-Зиминской ТЭЦ по общепринятой методике ОРГРЭС [7].

Котельный агрегат БКЗ-420-140, од-нобарабанный, вертикально-водотрубный, с естественной циркуляцией, предназначен для получения пара высокого давления при сжигании азейского бурого угля с твердым шлакоудалением⁹ [8].

Контроль по температуре среды выполнялся с помощью штатных термомпар. В качестве вторичных приборов был исполь-

зован электронный термометр «Testo 925».

Отбор проб сырого топлива производился из бункеров сырого угля (БСУ).

Отбор проб уноса для определения содержания горючих производился из-под гидрозатворов скрубберов.

Шлак от котла отбирался для определения содержания горючих из-под шнеков шлакоудаления.

Отбор и анализ продуктов сгорания производился с помощью переносного газоанализатора «Testo 350» в поворотной камере, в конвективной шахте за воздухоподогревателем (ВЗП) и за дымососами.

Определение технического состава

⁹ГОСТ Р 50831-95. Установки котельные. Тепломеханическое оборудование. Общие технические требования; утв. и введен в действие постановлением Госстандарта Российской Федерации от 25.10.1995 г. № 553 / GOST R 50831-95. Boiler plants. Thermomechanical equipment. General technical requirements; approved and put into effect by the decision of the State Standard of the Russian Federation of 25 October 1995 no. 553



топлива (W^r , A^r , Q_i^r , S^d , V^{daf}) и содержания горючих в уносе и шлаке ($\Gamma_{ун}$, $\Gamma_{шл}$) проводилось в химической лаборатории НЗТЭЦ.

Обработка результатов проводилась по известным методикам^{10,11} [9]. Коэффициент избытка воздуха по газовому тракту определялся по приближенной кислородной формуле:

$$\alpha = 21/(21 - O_2),$$

где O_2 – содержание кислорода в дымовых газах, %.

Потери теплоты с уходящими газами q_2 , %, определялись по формуле

$$q_2 = (K \cdot \alpha_{yx} + C) \cdot (g_{yx} - (\alpha_{yx} \cdot t_{x,в}) / ((\alpha_{yx} + b) \cdot (1 - 0,01 \cdot q_4) \cdot 10^{-2}),$$

где K , C , b – коэффициенты, зависящие от сорта и приведенной влажности топлива (для бурого угля составляют: $K = 3,46 + 0,021 \cdot W^{np}$; $C = 0,51 + 0,042 \cdot W^{np}$; $b = 0,16 + 0,011 \cdot W^{np}$, где W^{np} – приведенная влажность топлива, %); α_{yx} – коэффициент избытка воздуха в уходящих газах; g_{yx} – температура уходящих газов, °С; $t_{хв}$ – температура холодного воздуха, °С; q_4 – суммарная потеря теплоты от механической неполноты сгорания топлива, %.

Потери теплоты от химического недожога q_3 , %, определялись по следующей формуле:

$$q_3 = 3,32 \cdot CO_{yx} \cdot (\alpha_{yx} - 0,02),$$

где CO_{yx} – концентрация оксида углерода в уходящих газах, %.

Суммарные потери теплоты от механической неполноты сгорания топлива q_4 , %, определялись как

$$q_4 = 7,8 \times 10^{-3} \times \frac{A^r}{Q_i^r} \times \left(\frac{a_{ун} \times \Gamma_{ун}}{100 - \Gamma_{ун}} + \frac{a_{шл} \times \Gamma_{шл}}{100 - \Gamma_{шл}} \right),$$

где A^r – зольность на рабочую массу топлива, %; Q_i^r – низшая теплота сгорания на рабочую массу топлива, ккал/кг; $a_{ун}$ – доля золы топлива в уносе; $a_{шл}$ – доля золы топлива в шлаке; $\Gamma_{ун}$ – содержание горючих в уносе, %; $\Gamma_{шл}$ – содержание горючих в шлаке, %.

Потери теплоты в окружающую среду q_5 , %, определялись по формуле

$$q_5 = q_5^{ном} \times \frac{D_{ном}}{D},$$

где $q_5^{ном}$ – потери теплоты при номинальной нагрузке, %; $D_{ном}$ – номинальная нагрузка котла, т/ч; D – текущая нагрузка котла, т/ч.

Потери теплоты с физическим теплом шлака $q_{6шл}$, %, рассчитывались по формуле

$$q_{6шл} = a_{шл} \cdot (c \cdot g)_{шл} \cdot A^r / Q_i^r,$$

где $(c \cdot g)_{шл}$ – энтальпия шлака, ккал/кг; A^r – зольность на рабочую массу топлива, %; Q_i^r – низшая теплота сгорания на рабочую массу топлива, ккал/кг.

КПД котла определялся по обратному балансу:

$$\eta_{ка}^{бр} = 100 - \Sigma q, \quad \%,$$

где Σq – сумма потерь теплоты q_2 , q_3 , q_4 , q_5 , q_6 .

Истинные расходы среды (питательной воды, перегретого пара, конденсата на впрыски) определены с учетом введения поправок на расчетные параметры расходомерных шайб.

Приведенные значения потерь теплоты с уходящими газами, температуры уходящих газов и КПД котла брутто определены с учетом расчетных значений ис-

¹⁰РД 34.26.617-97. Методика оценки технического состояния котельных установок до и после ремонта. М.: СПО ОРГРЭС, 1998. 12 с. / RD 34.26.617-97. Methodology for assessing boiler plant technical conditions prior and after repair. Moscow: SPO ORGRES Publ., 1998. 12 p.

¹¹РД 34.09.155-93. Методические указания по составлению и содержанию энергетических характеристик оборудования тепловых электростанций. М.: СПО ОРГРЭС, 1993. 156 с. / RD 34.09.155-93. Methodical instructions for compilation and content of energy characteristics of thermal power plant equipment. Moscow: SPO ORGRES Publ., 1993. 156 p.



ходных параметров.

Температура точки росы дымовых газов при сжигании сернистых твердых топлив в пылевидном состоянии рассчитывается по приведенному содержанию серы и золы в топливе и температуре конденсации водяных паров [20]:

$$t_p = t_{\text{конд}}^{H_2O} + \frac{200 \cdot \sqrt[3]{S_{\text{пр}}^r}}{1,25 \alpha_{\text{ун}} \cdot A_{\text{пр}}^r}, ^\circ\text{C}, \quad (1)$$

где $t_{\text{конд}}^{H_2O}$ – температура конденсации водяных паров, $^\circ\text{C}$; $\alpha_{\text{ун}}$ – доля золы топлива в уносе; $S_{\text{пр}}^r$ – приведенное содержание серы

на рабочую массу топлива, $\% \cdot \text{кг/МДж}$; $A_{\text{пр}}^r$ – приведенное содержание золы на рабочую массу топлива, $\% \cdot \text{кг/МДж}$.

Приведенное содержание серы и золы на рабочую массу топлива определяется по формулам:

$$S_{\text{пр}}^r = \frac{10^3 \cdot S^p}{Q_p^H}; \quad A_{\text{пр}}^r = \frac{10^3 \cdot A^p}{Q_p^H};$$

где S^p , A^p – содержание серы и золы топлива соответственно, $\%$; Q_p^H – низшая теплота сгорания топлива, кДж/кг .

Результаты испытаний котлоагрегатов

Испытания котлоагрегатов ст. № 3, 4 проводились в соответствии с программой испытаний в диапазоне нагрузок от 230 до 400 т/ч. Во время испытаний котлы работали на азейском буром угле.

Измерения температуры выполнялись в поворотном газоходе конвективной шахты (за первой ступенью воздухоподогревателя ВЗП-I по ходу газов) на котле № 4 на отметке 6 м и перед ВЗП-I на котле № 3 на отметке 9 м в штатных местах.

До начала проведения каждого опыта (за 20 мин) отбирались пробы угля на химический анализ с помощью ручного пробоотборника из БСУ котлов. Стабилизировался режим работы котла. Проводился газовый анализ дымовых газов с измерением температуры конденсации водяных паров в них.

Анализ топлива на определение серы выполнялся в соответствии с ГОСТ Р 53356-2009¹². По результатам анализа производился пересчет серы в топливе с сухой на рабочую массу.

На основании полученных результатов построена зависимость приведенного содержания серы в топливе от содержания

в нем серы на рабочую массу для азейского угля (рис. 1). Из этой зависимости видно, что при близком техническом составе проб азейского угля полученный график имеет линейную зависимость и совпадает для обоих котлов.

В соответствии с п. 4.3.28 РД 34.20.501-95¹³ при значениях приведенной серы $S_{\text{пр}}^r > 0,4\% \cdot \text{кг} \cdot 10^3/\text{ккал}$ ($0,096\% \cdot \text{кг/МДж}$) температура воздуха на входе в ВЗП должна быть не ниже 80°C . Как видно из рис. 1, значению $S_{\text{пр}}^r = 0,096\% \cdot \text{кг/МДж}$ соответствует значение S^r около 1,71%. Это означает, что при содержании серы в топливе на рабочую массу 1,71% необходимо поднять температуру воздуха перед воздухоподогревателем до 80°C .

Определение содержания серы в топливе достаточно длительный процесс, что не позволяет оперативно воздействовать на режим работы оборудования. Полученные во время испытаний концентрации SO_2 в дымовых газах приведены к коэффициенту избытка воздуха $\alpha = 1,4$. На основании полученных данных построена зависимость концентрации SO_2 от содержания серы в топливе (рис. 2).

¹²ГОСТ Р 53356-2009. Топливо твердое минеральное. Определение серы с использованием ИК-спектрометрии. М.: Стандартинформ, 2009. 8 с. / GOST R 53356-2009. Solid mineral fuel. Determination of sulfur using IR spectrometry. Moscow: Standardinform Publ., 2009, 8 p.

¹³РД 34.20.501-95. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. М.: ЗАО «Энергосервис», 2003. 218 с. / RD 34.20.501-95. Rules of technical operation of power plants and networks of the Russian Federation. Moscow: ZAO Energoservis Publ., 2003, 218 p.

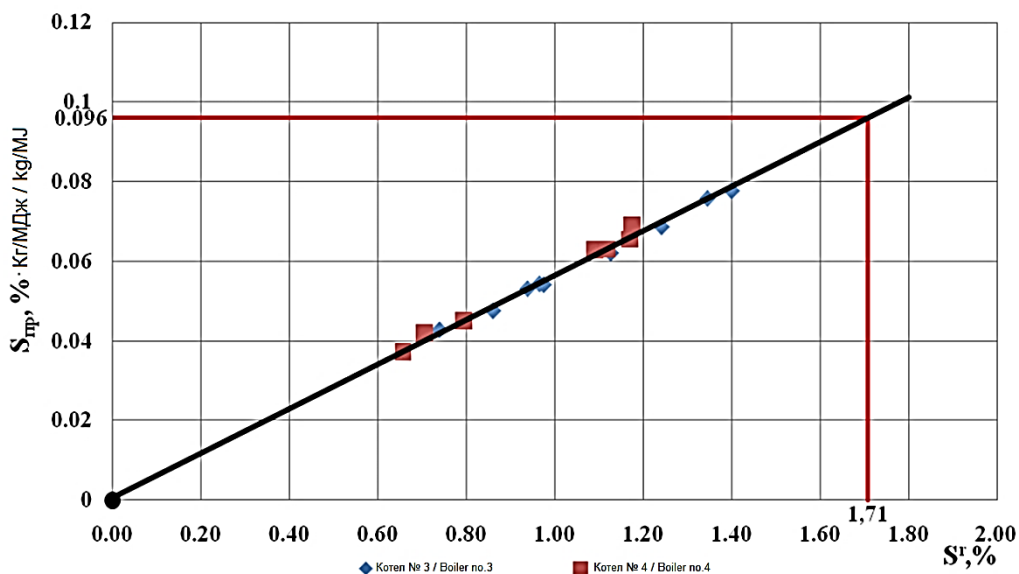


Рис. 1. Зависимость приведенной серы топлива от содержания серы на рабочую массу
Fig. 1. Dependence of fuel reduced sulfur on as-fired sulfur content

Температура конденсации водяных паров измерялась с помощью «Testo 335». Температура точки росы дымовых газов рассчитывалась по формуле (1), полученные значения изменялись в диапазоне от

108 до 124,6°C. На основании этих данных была построена зависимость температуры точки росы дымовых газов от содержания оксидов серы в них для азейского угля (рис. 3).

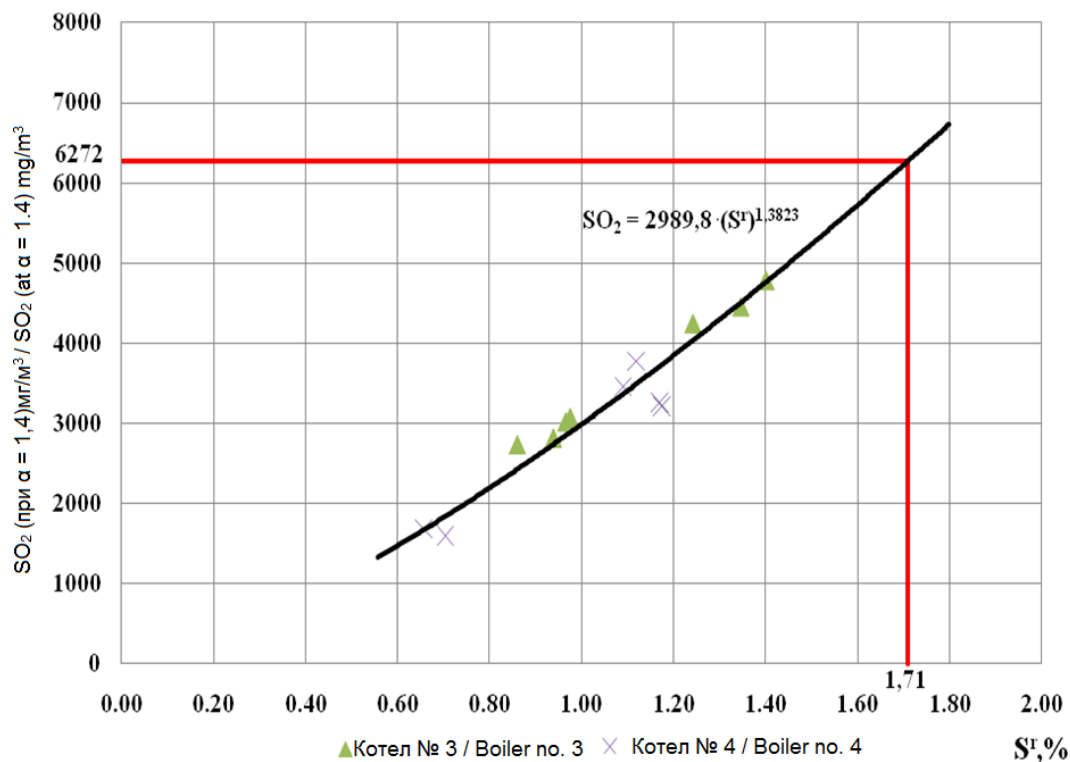


Рис. 2. Изменение концентрации оксидов серы от значений серы в топливе на рабочую массу
Fig. 2. Change in the concentration of sulfur oxides from the values of sulfur in fuel for the working mass



В результате анализа полученной зависимости была определена формула для расчета содержания SO_2 в дымовых газах в зависимости от содержания серы в топливе:

$$\text{SO}_2 = 2989,8 \cdot (S^f) \cdot 1,3823. \quad (2)$$

Для определения уровня концентрации SO_2 в зависимости от содержания серы в топливе на рабочую массу построен график в расширенном диапазоне – от 0,5 до 1,8% S^f с использованием формулы (2) При $S^f = 1,71\%$, что соответствует значению $S_{\text{пр}} = 0,4\% \cdot \text{кг} \cdot 103/\text{ккал}$ ($0,096\% \cdot \text{кг}/\text{МДж}$), концентрация SO_2 будет составлять $6272 \text{ мг}/\text{м}^3$. С учетом погрешности измерений и неравномерности газового потока концентрация SO_2 , соответствующая значению $S_{\text{пр}} = 0,4\% \cdot \text{кг} \cdot 103/\text{ккал}$ ($0,096\% \cdot \text{кг}/\text{МДж}$), предположительно находится в пределах от 6000 до 6500 $\text{мг}/\text{м}^3$.

В результате анализа построенной зависимости была получена формула для определения температуры точки росы в зависимости от концентрации SO_2 в дымовых газах:

$$t_p = 13,43 \cdot \ln(\text{SO}_2) + 7,562. \quad (3)$$

По формуле (3) определяется температура точки росы дымовых газов за ВЗП по измеренной с помощью газоанализатора и приведенной к $\alpha=1,4$ концентрации оксидов серы.

Температура воздуха перед воздухоподогревателем во время испытаний поддерживалась на уровне 70°C , что обусловлено режимной картой. В соответствии с РД 34.26.105-84¹⁴ температура воздуха перед ВЗП должна быть ниже температуры точки росы дымовых газов более чем на $45\text{--}50^\circ\text{C}$. В период испытаний эта разность составляла $40\text{--}57^\circ\text{C}$, т.е. немного отличалась от нормативных значений.

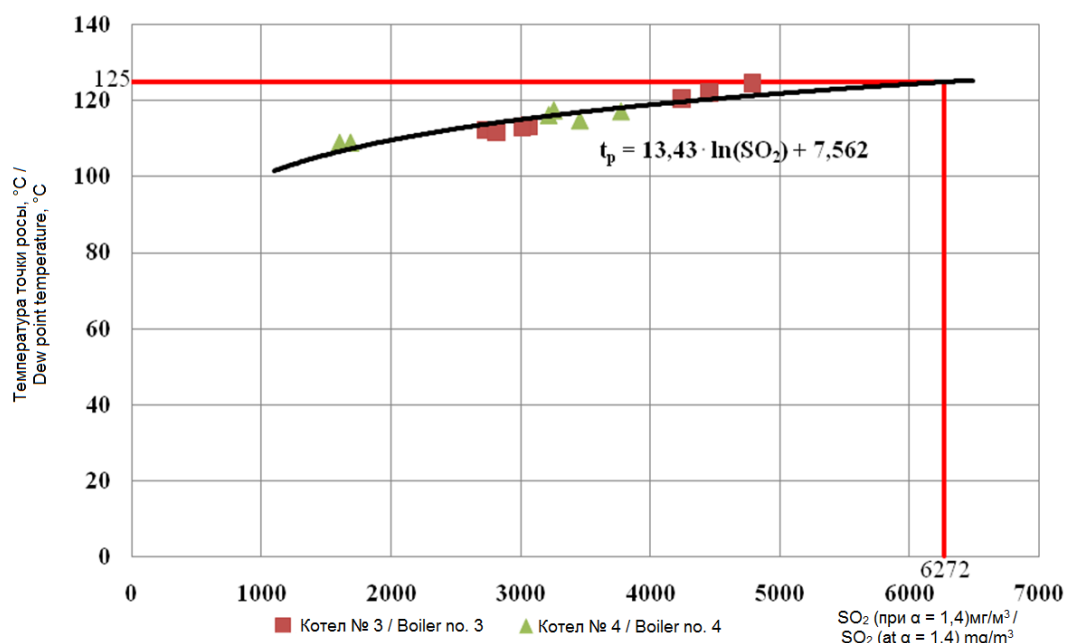


Рис. 3. Влияние концентрации SO_2 на температуру точки росы дымовых газов
Fig. 3. Effect of SO_2 concentration on the dew point temperature of flue gases

¹⁴РД 34.26.105-84 (МУ 34-70-118-84). Методические указания по предупреждению низкотемпературной коррозии поверхностей нагрева и газоходов котлов. М.: СПО «Союзтехэнерго», 1986. 12 с. / RD 34.26.105-84 (MU 34-70-118-84). Methodical instructions for preventing low-temperature corrosion of boiler heating surfaces and gas flues. Moscow: SPO "Soyuztekhnenergo" Publ., 1986, 12 p.



В соответствии с рекомендациями РД 34.26.105-84¹⁴ для определения температуры воздуха перед ВЗП в зависимости от концентрации оксидов серы в дымовых газах температура воздуха принята ниже точки росы на 50°C (рис. 4). Как было установлено выше, содержанию приведенной серы $S_{пр}=0,4\% \cdot \text{кг} \cdot 103 / \text{ккал}$ (0,096%·кг/МДж) соответствует концентрация $\text{SO}_2 \sim 6272 \text{ мг/м}^3$, при этом температура воздуха перед ВЗП в соответствии с п. 4.3.28 РД 34.20.501-95¹³ должна быть не ниже 80°C.

Температура воздуха перед ВЗП определяется по результатам измерений с помощью газоанализатора концентрации SO_2 по формуле:

$$t_{\text{ВЗП}} = 13,43 \cdot \ln(\text{SO}_2) - 42,438.$$

По результатам испытаний опреде-

лено, что значения температуры точки росы ниже температуры уходящих газов на котле № 4 на 2–4°C, а на котле № 3 – до 6°C.

Работа котла в таких режимах может вызвать низкотемпературную коррозию на поверхности труб ВЗП со стороны дымовых газов.

Для определения температуры уходящих газов за котлом в зависимости от концентрации оксидов серы в дымовых газах в соответствии с рекомендациями РД 34.26.105-84¹⁴ температура принята выше точки росы на 15°C (рис. 5).

Температура уходящих газов определяется по результатам измерений с помощью газоанализатора концентрации SO_2 по формуле

$$t_{\text{yx}} = 13,43 \cdot \ln(\text{SO}_2) + 22,562.$$

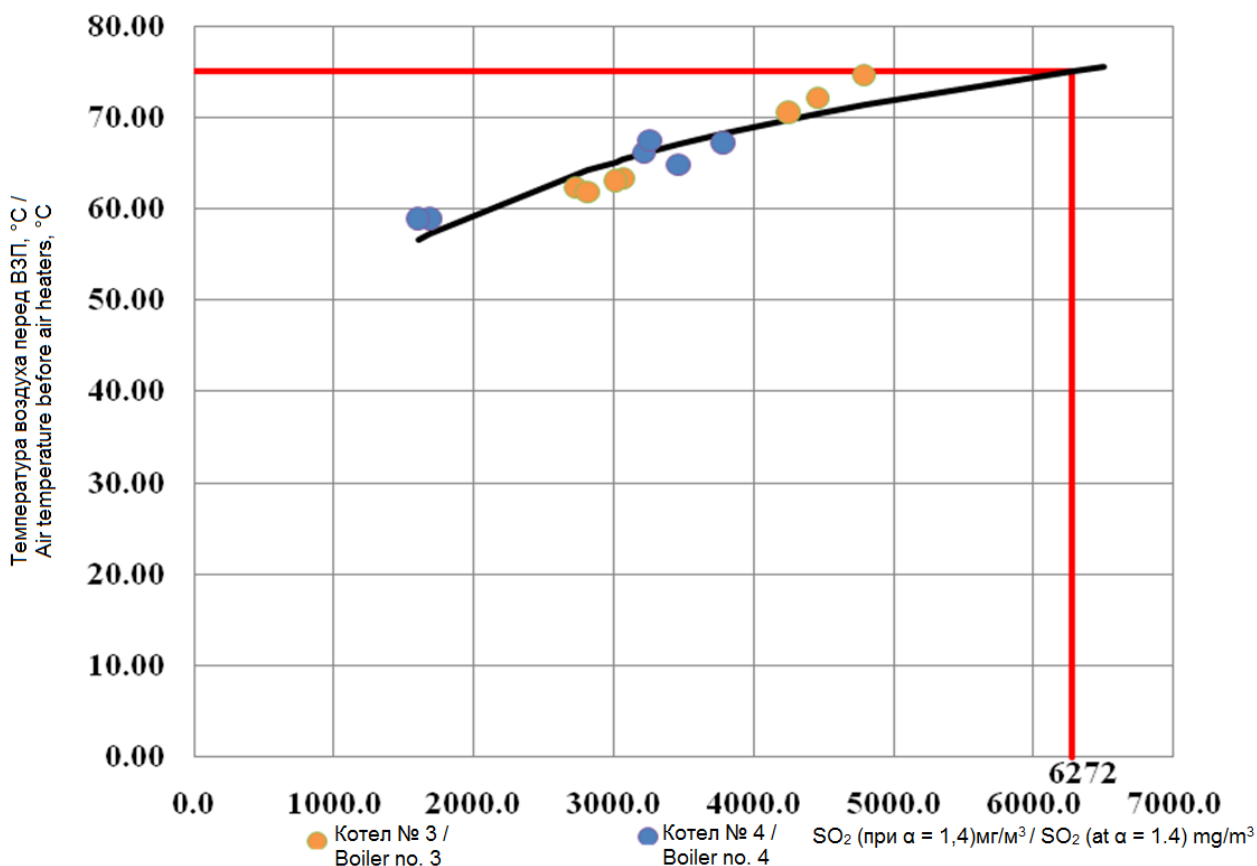


Рис. 4. Значение температуры воздуха перед воздухоподогревателем в зависимости от содержания SO_2 в дымовых газах

Fig. 4. The value of the air temperature before the air heater, depending on the SO_2 content in the flue gases

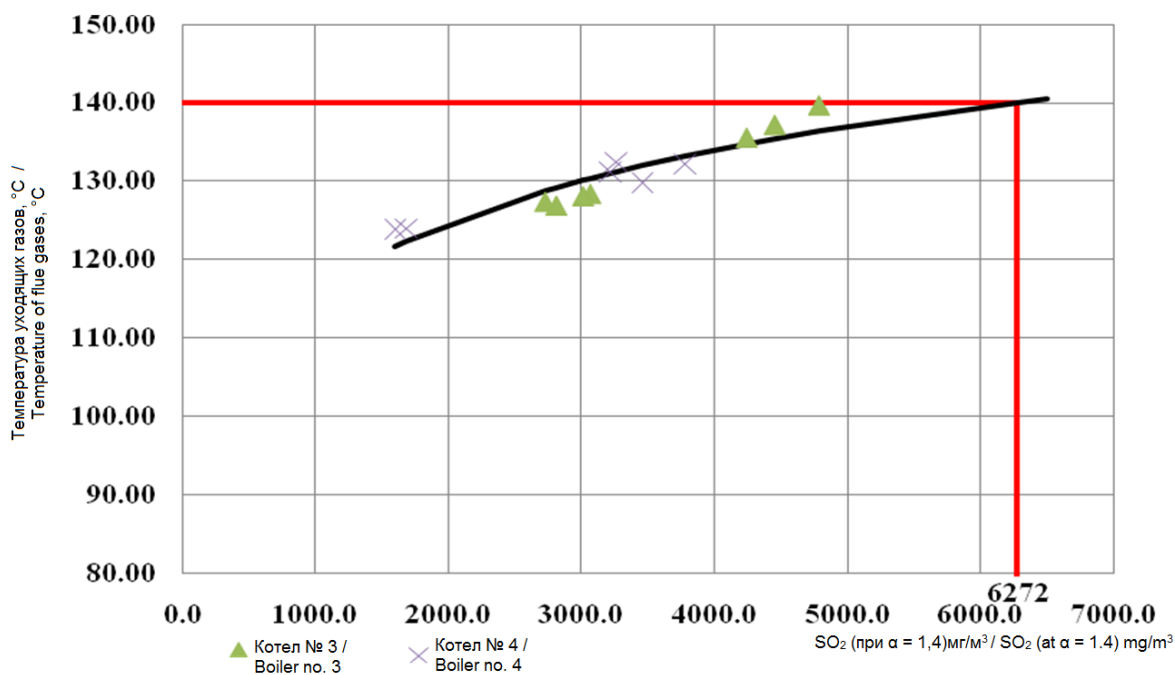


Рис. 5. Значение температуры уходящих газов в зависимости от концентрации оксидов серы
Fig. 5. Value of flue gas temperature depending on the concentration of sulfur oxides

Выводы по результатам испытаний

На основании результатов проведенных испытаний на котлоагрегатах БКЗ-420-140 ст. № 3, 4 Ново-Зиминской ТЭЦ по определению температуры точки росы дымовых газов установлено:

- для азейского угля, который сжигался во время испытаний, приведенное содержание серы в топливе от содержания в нем серы на рабочую массу имеет линейную зависимость;

- содержание выбросов оксидов серы в дымовых газах зависит от содержания серы в топливе на рабочую массу. Для азейского угля, с содержанием серы на рабочую массу в пределах от 0,5 до 1,9%, содержание SO₂ в дымовых газах определяется уравнением

$$SO_2 = 2989,8 \cdot (S')^{1,3823};$$

- температура точки росы в зависи-

мости от концентрации оксидов серы в дымовых газах, приведенной к коэффициенту избытка воздуха в уходящих газах $\alpha=1,4$, определяется уравнением

$$t_p = 13,43 \cdot \ln(SO_2) + 7,562;$$

- в рабочем диапазоне нагрузок температура точки росы приближается к температуре уходящих газов, что приводит к локальной конденсации паров серной кислоты;

- в период испытаний сжигаемый уголь имел содержание серы на рабочую массу в ограниченных пределах – от 0,66 до 1,4%, в связи с чем расчетный диапазон содержания серы в топливе на рабочую массу ограничен в пределах от 0,5 до 1,9%;

- температура воздуха перед ВЗП и уходящих газов определяются в зависимости от содержания SO₂ в дымовых газах.

Библиографический список

1. Нестеров В.И., Хорешок А.А. Актуальные аспекты улучшения качества добываемых углей // Вестник Кузбасского государственного технического универ-

ситета. 2004. № 6.1 (43). С. 12–14.

2. Равич М.Б. Эффективность использования топлива. М.: Наука, 1977. 344 с.



3. Кудряшов А.Н., Байбурин Р.Р., Елманов А.В., Кулагин Н.В. Снижение доли оксидов серы путем связывания их летучей золой при сжигании мугунского и ирбейского углей в котлоагрегатах Ново-Иркутской ТЭЦ // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 19–22 апреля 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2016. С. 207–211.

4. Некрасов Б.В., Федоров С.К., Епихин А.Н., Угначев В.И., Володин А.М. Решение проблемы снижения выбросов диоксида серы с дымовыми газами тепловых электростанций // Электроэнергетика России – 2008 / Russia Power – 2008: доклад на VI Московской междунар. выставке-конф. (Москва, 15–17 апреля 2008 г.) [Электронный ресурс] // Тригенерация. Портал по тригенерации, когенерации и мини-ТЭЦ. URL: [combienergy.ru/stat/956-Reshenie-](http://combienergy.ru/stat/956-Reshenie-problemy-sniizheniya-vybrossov-dioksida-sery)

[problemy-sniizheniya-vybrossov-dioksida-sery](http://combienergy.ru/stat/956-Reshenie-problemy-sniizheniya-vybrossov-dioksida-sery) (12.01.2018).

5. Алехнович А.Н. Характеристики и свойства энергетических углей. Челябинск: Цицеро, 2012. 549 с.

6. Алехнович А.Н. Сера в энергетических углях и её влияние на работу ТЭС. Челябинск: Цицеро, 2014. 123 с.

7. Трёмбовля В.И., Фингер Е.Д., Авдеева А.А. Теплотехнические испытания котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1991. 416 с.

8. Фёдоров А.И. Пособие по эксплуатации барабанных котлов среднего и высокого давления. М.: Изд-во ОАО «ВТИ», 2006. 188 с.

9. Пеккер Я.Л. Теплотехнические расчеты по приведенным характеристикам топлива (обобщенные методы). 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1977. 256 с.

Reference

1. Nesterov V.I., Khoreshok A.A. Relevant aspects of mined coal quality improvement. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Kuzbass State Technical University]. 2004, no. 6.1 (43), pp. 12–14. (In Russian).

2. Ravich M.B. *Effektivnost' ispol'zovaniya topliva*. [Fuel efficiency]. Moscow: Nauka Publ., 1977, 344 p. (In Russian).

3. Kudryashov A.N., Baiburin R.R., Elmanov A.V., Kulagin N.V. *Snizhenie doli oksidov sery putem svyazyvaniya ikh letuchei zoloi pri szhiganii mugunskogo i irbeiskogo uglei v kotloagregatakh Novo-Irkutskoi TETs* [Reduction of the percentage of sulfur oxides by binding them with fly ash when burning Mugunsky and Irbeisky coal in Novo-Irkutsk CHP boilers]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri"* [Proceedings of the All-Russia Scientific and Practical conference with international participation "Improving the efficiency of energy production and use in the conditions of Siberia"]. Irkutsk: Irkutskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2016, pp. 207–211. (In Russian).

4. Nekrasov B.V., Fedorov S.K., Epikhin A.N., Ugnachev V.I., Volodin A.M. *Reshenie problemy snizheniya vybrossov dioksida sery s dymovymi gazami teplovykh elektrostantsii* [Solving the problem of reducing sulfur dioxide emissions with CHP flue gases]. Doklad na VI

Moskovskoi mezhdunarodnoi vystavke-konferentsii "Elektroenergetika Rossii – 2008 / Russia Power – 2008" [Report at the VI Moscow International exhibition-conference "Energy Sector of Russia - 2008"]. Available at: combienergy.ru/stat/956-Reshenie-problemy-sniizheniya-vybrossov-dioksida-sery (accessed 12 January 2018).

5. Alekhovich A.N. *Kharakteristiki i svoistva energeticheskikh uglei* [Characteristics and properties of power generating coals]. Chelyabinsk: Tsitsero Publ., 2012, 549 p. (In Russian).

6. Alekhovich A.N. *Sera v energeticheskikh uglyakh i ee vliyanie na rabotu TES* [Sulfur in power generating coals and its influence on TPP operation]. Chelyabinsk: Tsitsero Publ., 2014, 123 p. (In Russian).

7. Trembovlya V.I., Finger E.D., Avdeeva A.A. *Teplo tekhnicheskie ispytaniya kotel'nykh ustanovok* [Thermal tests of boiler plants]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991, 416 p. (In Russian).

8. Fedorov A.I. *Posobie po ekspluatatsii barabannykh kotlov srednego i vysokogo davleniya* [Handbook on the operation of medium and high pressure drum boilers]. Moscow: JSC VTI Publ., 2006, 188 p. (In Russian).

9. Pekker Ya.L. *Teplotekhnicheskie raschety po privedennym kharakteristikam topliva (obobshchennye metody)* [Thermal calculations on given fuel characteristics (generalized methods)]. Moscow: Energiya Publ., 1977, 256 p. (In Russian).

Критерии авторства

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

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interest

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-183-193>

АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ АККУМУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ И ВОДОРОДА В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ С ВОЗОБНОВЛЯЕМЫМИ ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ

© О.В. Марченко¹, С.В. Соломин²

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Исследовать энергосистему, имеющую ветроэлектрические установки, фотоэлектрические преобразователи, электролизер для производства водорода, топливные элементы, для определения эффективности аккумулирования электрической энергии и водорода. **МЕТОДЫ.** На основе математического моделирования выбрана оптимальная структура энергосистемы и исследованы в динамике режимы работы источников и накопителей энергии. В отличие от известных в литературе подходов использованная математическая модель не требует предварительного задания режимов работы элементов системы или алгоритма переключения энергии между энергоисточниками, нагрузкой и аккумуляторами. Это позволяет исследовать сложные энергосистемы с одновременным производством и аккумулированием энергоносителей разных типов, в данном случае электро-энергии и водорода. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В качестве исходных данных выбраны климатические и метеорологические условия, приблизительно соответствующие условиям южной части Приморского края и средней части озера Байкал. Техничко-экономические показатели соответствуют представленному на российском рынке отечественному и зарубежному оборудованию. Расчеты проведены как без ограничений, так и с ограничениями на ввод отдельных технологий для оценки их эффективности. **ВЫВОДЫ.** Математическое моделирование показало эффективность совместного использования ветровой и солнечной энергии в рассматриваемых районах, а также одновременного аккумулирования и электроэнергии, и водорода. Аккумулирование электрической энергии наиболее эффективно в течение краткосрочных интервалов времени (выдача электрической мощности в течение нескольких часов). При увеличении длительности непрерывных энергетических затиший до нескольких суток более экономичным становится аккумулирование водорода. Экономический эффект, обеспечиваемый аккумулированием водорода, может достигать 50% суммарного эффекта при технико-экономических показателях оборудования, прогнозируемых на 10–15 лет. Полученные результаты позволяют обосновать выбор оборудования для энергоснабжения потребителей в автономных энергосистемах малой мощности.

Ключевые слова: ветроэлектрические установки, фотоэлектрические преобразователи, водород, электролизер, топливные элементы, аккумулирование энергии, экономическая эффективность.

Информация о статье. Дата поступления 25 января 2018 г.; дата принятия к печати 21 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Марченко О.В., Соломин С.В. Анализ эффективности аккумулирования электрической энергии и водорода в энергосистемах с возобновляемыми источниками энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 183–193. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-183-193

ANALYSIS OF ELECTRIC ENERGY AND HYDROGEN ACCUMULATION EFFICIENCY IN POWER SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

O.V. Marchenko, S.V. Solomin

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

¹Марченко Олег Владимирович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник отдела электроэнергетических систем, e-mail: marchenko@isem.irk.ru
Oleg V. Marchenko, Candidate of technical sciences, Leading Researcher of the Department of Electric Power Systems, e-mail: marchenko@isem.irk.ru

²Соломин Сергей Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела электроэнергетических систем, e-mail: solomin@isem.irk.ru
Sergei V. Solomin, Candidate of technical sciences, Senior Researcher of the Department of Electric Power Systems, e-mail: solomin@isem.irk.ru



ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to study the power system which contains wind turbines, photoelectric transducers, an electrolyzer for hydrogen production, fuel cells in order to determine the efficiency of electrical energy and hydrogen accumulation. **METHODS.** Based on the mathematical modeling an optimal structure of the power system has been selected and the operation modes of energy sources and storage devices have been studied in dynamics. Unlike the approaches known in the literature, the mathematical model used does not require preliminary setting of the operation modes of the system elements or the algorithms for energy switching between energy sources, load and accumulators. This allows us to investigate complex power systems which simultaneously produce and accumulate energy carriers of various types, in our case these are electrical energy and hydrogen. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Climatic and meteorological conditions that approximately correspond to the conditions of the southern part of Primorsky Krai and the middle part of Lake Baikal are chosen as input data. Technical and economic indicators correspond to the domestic and foreign equipment presented in the Russian market. Calculations are carried out both with and without restrictions on the introduction of specific technologies for their effectiveness evaluation. **CONCLUSIONS.** Mathematical modeling has shown the efficiency of the combined use of wind and solar energy in the areas under consideration as well as simultaneous accumulation of both electric energy and hydrogen. Accumulation of electric energy is most effective during short-term time intervals (output of electric power for several hours). If the duration of continuous no-wind and no-sun conditions increases up to several days the accumulation of hydrogen becomes more economical. The economic effect provided by the accumulation of hydrogen can reach 50% of the total effect under technical and economic indicators of equipment predicted for the next 10–15 years. The obtained results allow to substantiate the choice of equipment for consumer power supply in stand-alone power systems of small capacity.

Keywords: *wind turbines (WT), photovoltaic transducers (PT), hydrogen, electrolyzer, fuel cells, energy accumulation, economic efficiency*

Information about the article. Received January 25, 2018; accepted for publication February 21, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Marchenko O.V., Solomin S.V. Analysis of electric energy and hydrogen accumulation efficiency in power systems with renewable energy sources. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp 183–193. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-183-193

Введение

Перед человечеством стоит масштабная и сложная задача перехода к устойчивому развитию. Применительно к энергетике этот переход требует разработки и внедрения новых энергетических технологий, позволяющих повысить эффективность использования энергетических ресурсов за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и ограничить негативное воздействие энергетики на климат, природу и здоровье людей [1–4].

Установки, использующие ветровую и солнечную энергию, работают в неуправляемом режиме: их мощность изменяется случайным образом в связи со стохастическим характером природных процессов. Их объединение с аккумуляторами электрической энергии либо с водородной системой (электролизер, ресивер и топливные элементы), аккумулирующей энергию в виде запаса вторичного энергоносителя (водорода), позволяет обеспечить надежное электроснабжение потребителей в соответствии с графиком их нагрузки [5, 6].

Технически возможно дублирование мощности данных установок дизельными агрегатами, однако оно приводит к дополнительным затратам на топливо, в то время как значительная часть энергии, вырабатываемой ВИЭ, остается неиспользованной. Кроме того, существуют особо охраняемые природные территории (заповедники, национальные парки, заказники и пр.), где использование органического топлива должно быть исключено.

Электрические аккумуляторы обычно используются для краткосрочного аккумулирования энергии (до нескольких часов или десятков часов) [7, 8]. Для более продолжительных промежутков времени дешевле оказывается аккумулирование энергии в виде водорода [9].

В настоящей работе ставится задача оценить эффективность аккумулирования электрической энергии и водорода в энергосистеме с ВИЭ, расположенной в зоне, где использование органического топлива исключено, определение ее опти-



мальной структуры и режимов работы. Особенностью данного исследования является использование оптимизационной математической модели, которая позволя-

ет в динамике изучить систему, включающую одновременно разные технологии производства и аккумулирования энергии.

Математическая модель

Для расчетов структуры, режимов работы и экономических характеристик энергосистемы использована математическая модель REM-2 (Renewable Energy Model), описывающая энергосистему произвольной конфигурации, которая включает установки (технологии) производства, транспорта и аккумулирования энергии. Подробное описание модели приведено в работах [10, 11].

В модели для рассматриваемой энергосистемы задаются списки первичных энергоресурсов, вторичных энергоносителей и конечных видов энергии. К первичным энергоресурсам относится вся поступающая в систему извне энергия (например, топливо для электростанций). В конечную энергию включается энергия как потребляемая в данном пункте, так и поступающая на внешний рынок (например, произведенные в энергосистеме синтетическое топливо или водород).

В отличие от моделей, основанных на переборе вариантов структуры энергосистемы с последующим имитационным моделированием ее работы [12–15], оптимизационная модель, представленная в работе [10], не требует предварительного задания режимов работы элементов системы или алгоритма переключения энер-

гии между энергоисточниками, нагрузкой и аккумуляторами. Такой алгоритм может быть задан лишь в энергосистеме относительно простой конфигурации с аккумулированием энергии одного вида (аккумулятор заряжается, когда энергия, производимая ВИЭ, избыточна, и разряжается, когда ее недостаточно для электроснабжения потребителей). Вследствие этого модель REM-2 позволяет исследовать сложные энергосистемы с одновременным производством и аккумулированием энергоносителей разных типов, в данном случае это электрическая энергия и водород.

Искомые переменными являются установленные и текущие мощности энергоисточников, запасы вторичной энергии в аккумуляторах и их емкости, а также потоки энергии, направляемой на аккумулирование. Целевая функция Z представляет собой суммарные дисконтированные затраты на создание и эксплуатацию системы за весь срок ее службы. Для эффективных рынков ВИЭ решение задачи минимизации затрат, как показано в работе [16], близко к решению задачи рыночного равновесия.

Оптимизационная задача решалась с использованием алгоритмов оптимизации GAMS (General Algebraic Modeling System).

Расчетная схема

Рассматривалась экологически чистая система электроснабжения, состоящая из ветроэлектрических установок (ВЭУ), фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) и системы производства, хранения и энергетического использования водорода (рис. 1).

В отдельные моменты времени ВЭУ и ФЭП производят избыточное количество электроэнергии, превышающее потребность в ней (например, в периоды сильного

ветра или высокой интенсивности солнечного излучения). Избыточная электроэнергия поступает либо в аккумуляторные батареи, либо используется для производства водорода методом электролиза. Водород хранится в ресивере (емкости для хранения водорода), а затем, когда выработка ВЭУ и ФЭП недостаточна для электроснабжения потребителей, используется топливными элементами, вырабатывающими электрическую энергию.

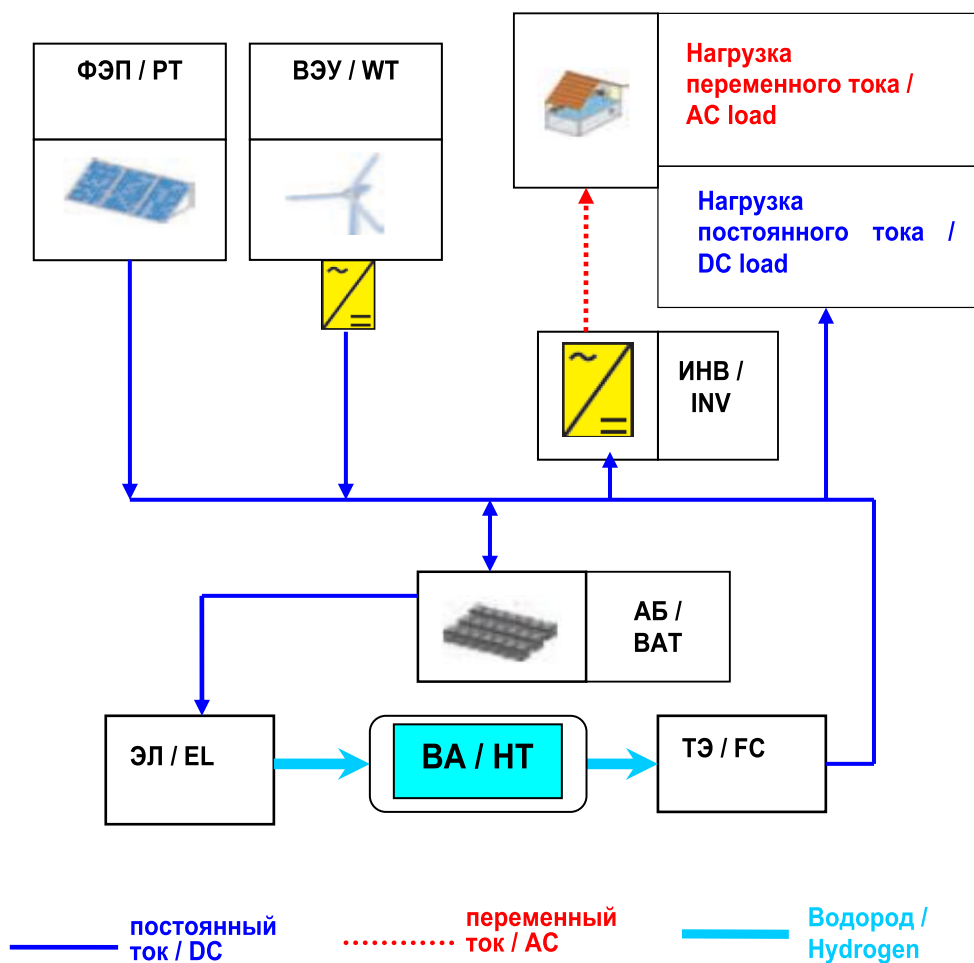


Рис. 1. Схема потоков энергии в системе электроснабжения с аккумулярованием электроэнергии и водорода. Обозначения: ФЭП – фотоэлектрические преобразователи; ВЭУ – ветроэлектрическая установка; АБ – аккумуляторные батареи; ЭЛ – электролизер; ВА – водородный аккумулятор; ТЭ – топливные элементы; ИНВ – инвертор

Fig. 1. Diagram of energy flows in a power supply system with electrical energy and hydrogen accumulation. Abbreviations: PT – photovoltaic transducers; WT – wind turbines; BAT – batteries for electric energy storage with charge controllers; EL – electrolyzer; HT – hydrogen tank; FC – fuel cells; INV – inverter

Исходные данные для расчетов

Рассматривалась автономная энергосистема с максимумом нагрузки 1 МВт и количеством часов ее использования – 4600 ч/год. Климатические и метеорологические условия приблизительно соответствуют условиям южной части Приморского края и средней части озера Байкал.

Сезонное изменение нагрузки и климатических показателей представлено в табл. 1. Случайный характер поступления

солнечной и ветровой энергии учитывался посредством формирования зависимости скорости ветра и интенсивности солнечного излучения от времени с шагом 1 ч (с учетом наличия продолжительных энергетических затиший). При этом средняя часовая скорость ветра находится в интервале 0–25 м/с, значение часовой мощности солнечного излучения – в интервале 0–0,9 кВт/м².



Таблица 1
Сезонное изменение нагрузки, скорости ветра и прихода солнечной радиации
Table 1

Seasonal change in load, wind speed and insolation

Параметр / Parameter	Значение / Value				
	Зима / Winter	Весна / Spring	Лето / Summer	Осень / Autumn	Всего за год / Total for a year
Максимальная нагрузка / Maximum load, %	100	80	70	90	100
Средняя нагрузка, % от годового максимума / Average load, % of annual maximum	60	50	40	50	50
Средняя многолетняя скорость ветра (на высоте 10 м), м/с / Long-term average wind speed (at 10 m height), m/s	7	4	3	6	5
Скорость ветра, м/с / Wind speed, m/s	0–25	0–20	0–20	0–20	0–25
Суммарный приход солнечной радиации, кВт·ч/м ² / Total insolation, kWh/m ²	120	440	520	220	1300
Часовая мощность солнечной радиации, кВт/м ² / Hour capacity of solar radiation, kW/m ²	0–0,3	0–0,6	0–0,9	0–0,5	0–0,9

В настоящее время на мировом и российском рынках доступны солнечные панели с удельной ценой 1000 долл./кВт и КПД более 15% (например, Astronergy CHSM6610P-260 Silver Poly Solar Panel) и солнечные контроллеры (импортные – MidNite Classic LITE 150 MPPT Charge Controller и Four Star Solar Classic 150 Triple PV Center, а также российские – ECO Energia MPPT Pro).

Рабочая характеристика ВЭУ [17, 18] (зависимость выходной мощности от скорости ветра): скорость трогания $V_0=5$ м/с, номинальная скорость $V_n=12$ м/с, максимальная скорость ветра $V_m=25$ м/с, высота башни – 25 м). В отдельные моменты времени скорость ветра превышает номинальную скорость ВЭУ (12 м/с на высоте оси ветроустановки) и срабатывает ограничение по мощности (она достигает номинального значения). Если скорость на высоте оси меньше 12 м/с, но выше 5 м/с, то

ВЭУ вырабатывает мощность пропорциональную кубу скорости ветра. Эта мощность меньше номинальной мощности ВЭУ. В отдельные часы скорость ветра меньше скорости трогания (5 м/с) и ВЭУ не вырабатывает электроэнергию. При переходе от высоты 10 м к высоте оси ВЭУ (ветроэлектрической установки) (25 м) учитывается распределение вертикального профиля ветра по логарифмическому закону (скорость ветра возрастает с увеличением высоты) [17, 18].

В табл. 2 приведены современные показатели рассматриваемой системы с учетом существенного уменьшения за последние 1,5–2 года цен на фотоэлектрические преобразователи (в меньшей степени – на электролизеры и топливные элементы) и их возможного изменения в будущем, примерно к 2025 г. (прогнозные показатели) [6, 9, 19, 20].



Таблица 2

Технико-экономические показатели, принятые в расчетах

Table 2

Technical and economic indicators used in calculations

Устройство/ Device	Удельные капиталовложения, долл./кВт / Specific capital investments, US\$/kW	Затраты, % от капиталовложений / O&M, % of invest- ments	КПД / Efficiency, %	Срок службы, лет / Lifetime, years
ВЭУ (WT)	2200	2,0	30	25
ФЭП (PT)	1500	1,5	15	25
АБ (BAT)	150*	3,0	85	5
Водородная система – современные показатели / Hydrogen system – current characteristics				
ЭЛ (EL)	2500–3500	5,0	75	10
ТЭ (FC)	3000–4000	2,5	45	10
ВА (HT)	25*	2,0	95	20
Водородная система – прогнозные показатели / Hydrogen system – estimated characteristics				
ЭЛ (EL)	1000–1500	2,2	80	10
ТЭ (FC)	1200–2000	2,5	50	20
ВА (HT)	15–20*	2,0	95	20

*Долл./кВт·ч / US\$/kWh.

Результаты расчетов и их анализ

Для оценки эффективности системы производства и аккумулирования водорода наряду с оптимизационными расчетами (без ограничений на отдельные технологии) проведены расчеты с запретом на использование водорода (ниже – вариант «без водорода»).

Оптимальная система электроснабжения включает ФЭП, ВЭУ, а также аккумуляторы электроэнергии и водорода. Запрет на использование водорода приводит к увеличению установленных мощностей ВЭУ, ФЭП, емкости аккумулятора (табл. 3) и увеличению затрат. Это означает, что добавление к ВИЭ водородной системы обеспечивает положительный экономический эффект уже при современных технико-экономических показателях. При улучшении показателей электролизеров и топливных элементов в перспективе этот эффект возрастет. Значение целевой функции варианта «с водородом» уменьшается на 50% по сравнению с вариантом «без водорода».

Наряду с определением структуры энергосистемы и затрат на ее создание и

эксплуатацию представляет интерес анализ динамики производства, аккумулирования и потребления энергии. Соответствующие графики для типовых зимних и летних суток приведены на рис. 2. Заряд АБ и поток энергии (водорода) в ресивер показаны в области отрицательных значений оси ординат.

В зимние сутки (рис. 2, а) выработка электроэнергии от ФЭП незначительна. В часы, когда мощность ВЭУ превышает мощность нагрузки, осуществляется заряд аккумуляторных батарей и заполнение водородного аккумулятора. В часы, когда мощность ВИЭ недостаточна, осуществляется разряд АБ. В отдельные часы (в приведенном примере – с 14 до 16 ч) бесперебойность электроснабжения обеспечивается в основном за счет разряда батарей. В рассмотренном случае вследствие краткосрочности перерывов электроснабжения от ВЭУ запасенной в аккумуляторе электроэнергии достаточно для обеспечения бесперебойности электроснабжения, и включения топливных элементов не требуется.



Таблица 3

Оптимальный состав системы электроснабжения

Table 3

Optimal structure of a power supply system

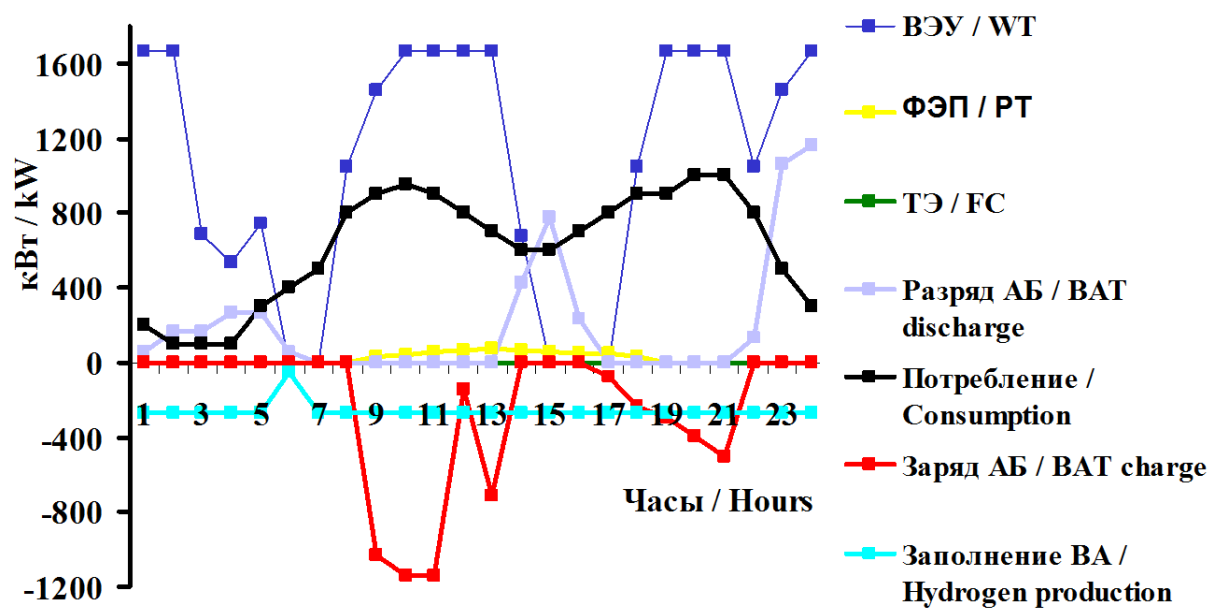
Вариант системы / Variant of a system	Установленные мощности, кВт / Installed capacities, kW					Емкости, кВт·ч / Storage capacities, kWh	
	ВЭУ / WT	ФЭП / PT	ЭЛ / EL	ТЭ / FC	ИНВ / INV	АБ / BAT	ВА / HT
Современные показатели / Current characteristics							
Без водорода / without hydrogen	1800	1600	0	0	1010	34500	0
С водородом / with hydrogen	1700	1250	330	800	1010	3960	104130
Перспективные показатели / Estimated characteristics							
Без водорода / without hydrogen	1800	1600	0	0	1010	34550	0
С водородом / with hydrogen	1600	1300	580	840	1010	2220	109950

В летние сутки (рис. 2, б) перерывы в работе ВЭУ более продолжительны, в отдельные часы осуществляется выработка электроэнергии топливными элементами за счет запасенного ранее водорода. В предрассветные часы одновременно разряжаются АБ и включаются топливные элементы. В предполуденные часы суммарной мощности ВЭУ и ФЭП оказывается достаточно для покрытия графика нагрузки, в послеполуденные часы после прекращения выработки ВЭУ одновременно работают ФЭП и ТЭ. В вечерние часы поддержание баланса производства-потребления электроэнергии обеспечивают ВЭУ, при падении скорости ветра вновь включаются топливные элементы.

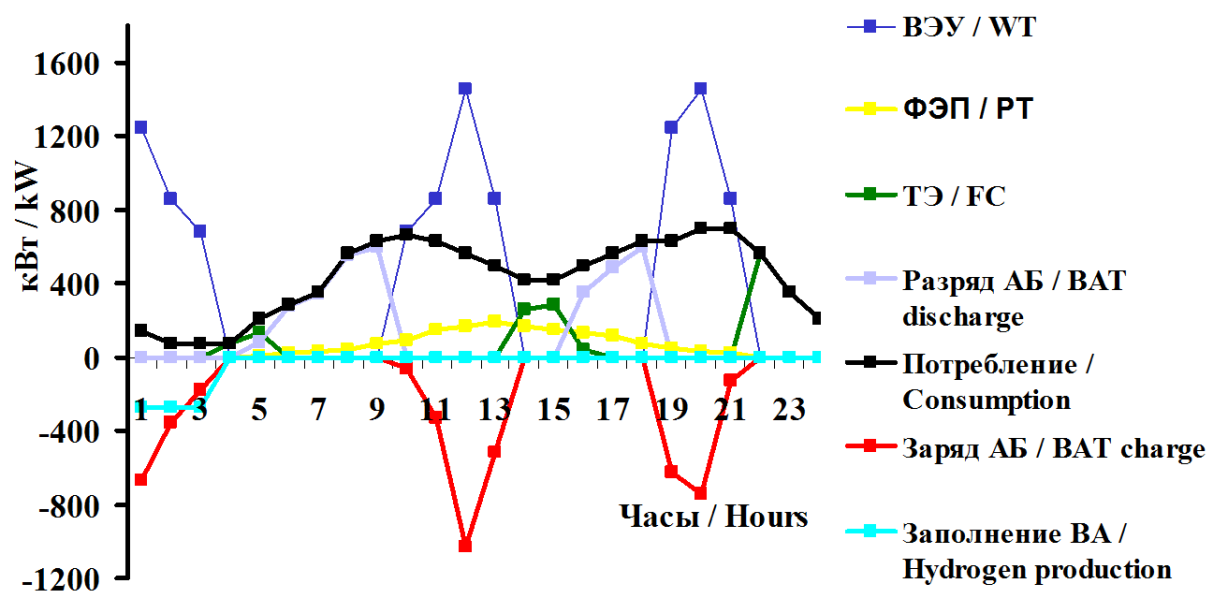
Вклад энергоисточников в суммарную выработку электроэнергии приведен на рис. 3. С улучшением показателей водородной системы увеличивается оптимальная доля ТЭ.

Оптимальная емкость АБ позволяет обеспечивать бесперебойность электроснабжения при максимуме нагрузки в течение ~4 ч, оптимальная емкость ресивера позволяет гарантировать электроснабжение в течение свыше 100 ч при полном прекращении выработки ВИЭ (например, при одновременном установлении четырехсуточного энергетического штиля при постоянной высокой облачности или непрерывном дожде, препятствующих работе ВЭУ и ФЭП).

Результаты расчетов существенно зависят от продолжительности и непрерывности энергетических затиший. В случае их отсутствия наиболее экономичным вариантом являлось бы использование ВЭУ, ФЭП и аккумуляторных батарей с емкостью, позволяющей обеспечивать нагрузку в течение нескольких часов. Тогда производства и аккумуляирования водорода не требовалось бы. Однако для рассмотренных метеорологических условий характерны непрерывные энергетические затишья продолжительностью не менее 2–4 суток. При увеличении непрерывной длительности энергетических затиший (простоев ВЭУ и отсутствия выработки ФЭП) возникает необходимость производства и аккумуляирования водорода, причем емкость ресивера растет как с увеличением времени непрерывных простоев, так и с улучшением показателей водородной системы (электролизеров, топливных элементов, емкостей для хранения водорода). Это согласуется с полученными ранее результатами (представлены в работе [9]), согласно которым аккумуляирование электрической энергии эффективно для краткосрочных интервалов времени (в данном случае это выдача максимальной электрической мощности в течение нескольких часов), а для более длительных интервалов времени (несколько суток) более эффективно аккумуляирование энергии в виде водорода.



a



b

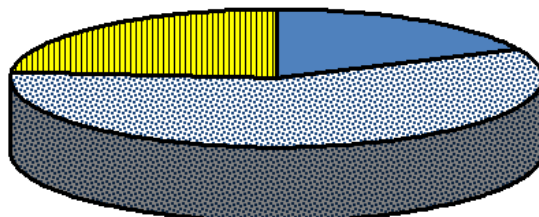
Рис. 2. Графики выработки и аккумуляции энергии:

а – зимние сутки; б – летние сутки

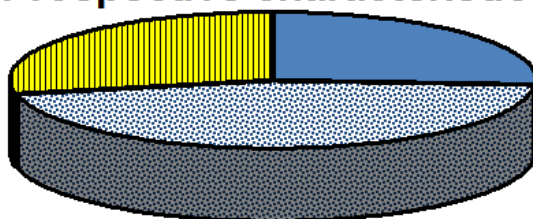
Fig. 2. Graphs of energy generation and accumulation: a – winter day; b – summer day



Современные показатели / Current characteristics



Перспективные показатели / Prospective characteristics



■ ТЭ / FC ■ ВЭУ / WT ■ ФЭП / PT

Рис. 3. Вклад энергоисточников в выработку электроэнергии
Fig. 3. Contribution of energy sources to electrical energy generation

Выводы

Проведено исследование экологически чистой системы электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии. Система включает фотоэлектрические преобразователи, ветроэлектрические установки, аккумуляторы электроэнергии и систему производства, хранения и энергетического использования водорода.

Расчеты с помощью оптимизационной математической модели показали эффективность совместного использования ветровой и солнечной энергии в рассматриваемых районах, а также одновременного аккумулирования и электроэнергии, и водорода.

Аккумулирование электрической энергии наиболее эффективно в течение краткосрочных интервалов времени (выдача электрической мощности в течение нескольких часов). При увеличении длительности непрерывных энергетических затиший до нескольких суток более экономич-

ным становится аккумулирование водорода. Результаты моделирования согласуются с оценками, представленными в публикации [9].

Экономический эффект, обеспечиваемый аккумулированием водорода в рассматриваемой системе электроснабжения, оказался значительным: он может достигать 50% при технико-экономических показателях электролизеров, топливных элементов и водородных аккумуляторов, прогнозируемых на 10–15 лет.

Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.1.2 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310448-0, а также научного проекта III.17.6.2 программы фундаментальных исследований СО РАН III.17.6.2, рег. № АААА-А17-117030310447-3.



Библиографический список

1. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N.I., Styczynski Z.A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies // *Renewable Energy*. 2016. Vol. 90. P. 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>
2. Сокольникова Т.В., Суслов К.В., Ломбарди П. Определение оптимальных параметров накопителя для интеграции возобновляемых источников энергии в изолированных энергосистемах с активными потребителями // *Вестник ИрГТУ*. 2015. № 10 (105). С. 206–212.
3. Суслов К.В. Развитие систем электроснабжения изолированных территорий России с использованием возобновляемых источников энергии // *Вестник ИрГТУ*. 2017. Т. 21. № 5. С. 131–142. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-131-142>
4. Марченко О.В., Соломин С.В. Системные исследования эффективности возобновляемых источников энергии // *Теплоэнергетика*. 2010. № 11. С. 12–17.
5. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of small autonomous wind/diesel/hydrogen systems in Russia // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2013. Vol. 3. No. 2. P. 241–245.
6. Marchenko O.V., Solomin S.V. Modeling of hydrogen and electrical storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. No. 15. P. 9361–9370. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.076>
7. Dufo-Lopez R. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. No. 1. P. 4033–4041. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.019>
8. Huang Q. Multi-turbine wind-solar hybrid system // *Renewable Energy*. 2015. Vol. 76. No. 11. P. 401–407. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.019>
9. Marchenko O.V., Solomin S.V. The future energy: hydrogen versus electricity // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015. Vol. 40. No. 10. P. 3801–3805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.132>
10. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers // *International Journal of Low-carbon Technologies*. 2010. Vol. 5. No. 4. P. 250–255. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq031>
11. Марченко О.В., Соломин С.В. Эффективность совместного использования возобновляемых источников энергии // *Вестник ИрГТУ*. 2017. Т. 21. № 8. С. 111–121. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-8-111-121>
12. Ngan M.S. Assessment of economic viability for PV/wind/diesel hybrid energy system in southern Peninsular Malaysia // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012. Vol. 16. No. 1. P. 634–647. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.028>
13. Sigarchian S.G., Malmquist A., Fransson T. Modeling and control strategy of a hybrid PV/Wind/Engine/Battery system to provide electricity and drinkable water for remote applications // *Energy Procedia*. 2014. Vol. 57. P. 1401–1410. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.087>
14. Carapelucci R., Giordano L. Modeling and optimization of an energy generation island based on renewable technologies and hydrogen storage systems // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. No. 3. P. 2081–2093. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.073>
15. Akyuz E., Oktay Z., Dincer I. Performance investigation of hydrogen production from a hybrid wind-PV system // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012. Vol. 37. No. 21. P. 16623–16630. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.149>
16. Marchenko O.V. Mathematical modelling of electricity market with renewable energy sources // *Renewable Energy*. 2007. Vol. 32. No. 6. P. 976–990. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.004>
17. Марченко О.В., Соломин С.В. Вероятностный анализ эффективности ветроэнергетических установок // *Известия РАН. Энергетика*. 1997. № 3. С. 52–60.
18. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia // *Renewable Energy*. 2004. Vol. 29. No. 11. P. 1793–1809. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.006>
19. Marchenko O.V., Solomin S.V. Economic efficiency of renewable energy sources in Russia // *International Journal of Renewable Energy Research*. 2014. Vol. 4. No. 3. P. 548–554.
20. Projected costs of generating electricity. 2015 edition. Paris: International Energy Agency/Nuclear Energy Agency, 2015. 215 p.

References

1. Lombardi P., Sokolnikova T., Suslov K., Voropai N.I., Styczynski Z.A. Isolated power system in Russia: a chance for renewable energies. *Renewable Energy*. 2016, vol. 90, pp. 532–541. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.01.016>
2. Sokol'nikova T.V., Suslov K.V., Lombardi P. Determining optimal energy storage parameters for renewable energy sources integration in isolated energy systems with active consumers. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 10 (105), pp. 206–212. (In Russian).
3. Suslov K.V. Development of power supply systems of Russian isolated territories using renewable energy sources. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 5, pp. 131–142. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-5-131-142>
4. Marchenko O.V., Solomin S.V. System studies for



analyzing the efficiency of renewable energy sources. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 2010. no. 11. pp. 12–17. (In Russian).

5. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of small autonomous wind/diesel/hydrogen systems in Russia. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2013, vol. 3, no. 2, pp. 241–245.

6. Marchenko O.V., Solomin S.V. Modeling of hydrogen and electrical storages in wind/PV energy system on the Lake Baikal coast. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017, vol. 42, no. 15, pp. 9361–9370. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.02.076>

7. Dufo-Lopez R. Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage. *Applied Energy*. 2011, vol. 88, no. 1, pp. 4033–4041. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.019>

8. Huang Q. Multi-turbine wind-solar hybrid system. *Renewable Energy*. 2015, vol. 76, no. 11, pp. 401–407. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.04.019

9. Marchenko O.V., Solomin S.V. The future energy: hydrogen versus electricity. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2015, vol. 40, no. 10, pp. 3801–3805. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.01.132>

10. Marchenko O.V. Mathematical modeling and economic efficiency assessment of autonomous energy systems with production and storage of secondary energy carriers. *International Journal of Low-carbon Technologies*. 2010, vol. 5, no. 4, pp. 250–255. <https://doi.org/10.1093/ijlct/ctq031>

11. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of renewable energy sources combined use. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 8, pp. 111–121. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-8-111-121>

12. Ngan M.S. Assessment of economic viability for PV/wind/diesel hybrid energy system in southern Peninsular Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2012, vol. 16, no. 1, pp. 634–647.

Критерии авторства

Марченко О.В. и Соломин С.В. имеют равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.028>

13. Sigarchian S.G., Malmquist A., Fransson T. Modeling and control strategy of a hybrid PV/Wind/Engine/Battery system to provide electricity and drinkable water for remote applications. *Energy Procedia*. 2014, vol. 57, pp. 1401–1410. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.10.087>

14. Carapelucci R., Giordano L. Modeling and optimization of an energy generation island based on renewable technologies and hydrogen storage systems. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012, vol. 37, no. 3, pp. 2081–2093. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.10.073>

15. Akyuz E., Oktay Z., Dincer I. Performance investigation of hydrogen production from a hybrid wind-PV system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2012, vol. 37, no. 21, pp. 16623–16630. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.02.149>

16. Marchenko O.V. Mathematical modelling of electricity market with renewable energy sources. *Renewable Energy*. 2007, vol. 32, no. 6, pp. 976–990. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.004>

17. Marchenko O.V., Solomin S.V. Probabilistic analysis of wind power plant efficiency. *Izvestiya RAN. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 1997, no. 3, pp. 52–60. (In Russian).

18. Marchenko O.V., Solomin S.V. Efficiency of wind energy utilization for electricity and heat supply in northern regions of Russia. *Renewable Energy*. 2004, vol. 29, no. 11, pp. 1793–1809. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.02.006>

19. Marchenko O.V., Solomin S.V. Economic efficiency of renewable energy sources in Russia. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2014, vol. 4, no. 3, pp. 548–554.

20. Projected costs of generating electricity. 2015 edition. Paris: International Energy Agency/Nuclear Energy Agency, 2015, 215 p.

Authorship criteria

Marchenko O.V. and Solomin S.V. have equal author's 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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.054.8

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-194-208>

ИЗВЛЕЧЕНИЕ НИКЕЛЯ И КОБАЛЬТА ИЗ ЛЕЖАЛЫХ И ВНОВЬ ОБРАЗОВАННЫХ ОТВАЛЬНЫХ НИКЕЛЕВЫХ ШЛАКОВ

© А.А. Веселовский¹

ООО ПК «Ходовые системы»,

454091, Российская Федерация, г. Челябинск, ул. Карла Маркса, 52, оф. 20а.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Данная работа направлена на доизвлечение никеля из отвальных лежалых и вновь образованных никелевых шлаков термодиффузионным способом. **МЕТОДЫ.** Использован метод термодиффузии, состоящий из перевода никеля в шлаке в галогенидное соединение и последующее осаждение его на стальной подложке (корольков железа), образующихся в шлаке при восстановлении содержащегося в нем железа. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В результате химико-термической обработки отвального никелевого шлака, последующей магнитной сепарации и переплава магнитного концентрата получен железоникелевый сплав, содержащий 6,0–9,2 % масс. никеля. **ВЫВОДЫ.** Предлагаемый способ доизвлечения никеля и кобальта из отвальных шлаков никелевых производств позволяет извлекать, используя недорогие реагенты (отсев кокса и хлористый аммоний) и оборудование до 80–85% отвального никеля и почти 100% отвального кобальта в конечный металлопродукт – ферроникель.

Ключевые слова: никелевый шлак, никель, отвальный, извлечение, шлак, ресурсосбережение.

Информация о статье. Дата поступления 15 января 2018 г.; дата принятия к печати 08 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования: Веселовский А.А. Извлечение никеля и кобальта из лежалых и вновь образованных отвальных никелевых шлаков // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 194–208. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-194-208

NICKEL AND COBALT RECOVERY FROM AGED AND NEWLY FORMED NICKEL DUMP SLAG

A.A. Veselovsky

“Propulsion systems” PC LLC,

52, Karl Marx St., office 20A, Chelyabinsk, 454091, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of this work is additional recovery of nickel from aged and newly formed nickel dump slag by a thermodiffusion method. **METHODS.** The study employs the method of thermodiffusion comprising the transformation of nickel in slag in the halide compound with the following deposition on a steel substrate (iron shots) formed in slag under the recovery of iron contained in it. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** An iron-nickel alloy containing 6.0–9.2% nickel weight has been obtained as a result of chemical and heat treatment of dump nickel slag with the following magnetic separation and smelting of the magnetic concentrate. **CONCLUSIONS.** The proposed method of additional recovery of nickel and cobalt from dump slags of nickel production allows to extract up to 80–85% of dump nickel and nearly 100% of dump cobalt into the end metal product – ferronickel using inexpensive reagents (undersized coke and ammonium chloride) and equipment.

Keywords: nickel slag, nickel, dump, recovery, slag, resource conservation

Information about the article. Received January 15, 2018; accepted for publication February 08, 2018; available online March 31, 2018.

¹Веселовский Александр Александрович, кандидат технических наук, руководитель службы технического контроля, e-mail: a_a-ves@mail.ru

Alexander A. Veselovsky, Candidate of technical sciences, Head of the Technical Control Service, e-mail: a_a-ves@mail.ru



For citation: Veselovsky A.A. Nickel and cobalt recovery from aged and newly formed nickel dump slag. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 194–208. (In Russian) DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-194-208

Введение

Обеднение известных рудных месторождений и непрерывный рост производства цветных металлов вызвали научный и промышленный интерес к техногенным отходам металлургических предприятий, рассматривая их вовлечение в процесс производства с целью снижения себестоимости минерального сырья [1].

Отвальные никелевые шлаки в твердом состоянии частично перерабатываются чисто механическими методами с целью извлечения магнитной никельсодержащей фазы^{2,3} [2–4]. Цветные металлы, находящиеся в этих шлаках в немагнитных соединениях, не извлекаются и находятся в отвалах. Не магнитная фракция отвальных шлаков частично используется для изготовления абразивного порошка для пескоструйной обработки металлоизделий, в качестве щебня для строительства дорог неответственного назначения, железнодорожных насыпей и т.д. Содержащиеся здесь цветные металлы теряются безвозвратно.

Применение флотационного метода обогащения отвальных никелевых шлаков эффективно для шлаков, возраст которых не превышает 15 лет. Тогда данным методом можно извлечь в коллективный металлопродукт от 30 до 70% цветных металлов. При более длительном хранении содержание окисленных форм минералов возрастает, флотационное извлечение металлов резко снижается [5].

Одним из перспективных направле-

ний использования лежалых отвальных никелевых шлаков является применение их в качестве шихтовых материалов для создания термодиффузионных никелевых покрытий [6]. Такие покрытия могут успешно использоваться для защиты от сероводородной коррозии деталей скважинного оборудования, геофизических приборов, механизма и инструмента, применяемого для перфорации скважин [7]. Дешевизна сырьевых материалов, простота технологического процесса и недорогое оборудование прогнозируют перспективность применения данного метода для лежалых отвальных шлаков любого возраста в существующих производствах не только в нефте- и газодобывающих отраслях, но и, например, в качестве консервационных защитных от атмосферных воздействий любой номенклатуры и назначения деталей при транспортировке и хранении их в открытых эстакадах.

Метод диффузионного насыщения из отвальных шлаков можно адаптировать к процессам извлечения цветных металлов и частично железа. Для этого необходимо в реакционной шихте создать искусственные центры осаждения – стальные подложки из восстановленного из шлака железа. В процессах насыщения данные выделения легируются посредством диффузии и в последующем извлекаются в металлический продукт магнитной сепарацией.

Исследованиям данного направления посвящена данная работа.

²Ванюков А.В., Уткин Н.И. Комплексная переработка медного и никелевого сырья: учебник для вузов. Челябинск: Metallurgy, 1988. 432 с. / Vanyukov A.V., Utkin N.I. Complex processing of copper and nickel raw materials: Textbook for universities. Chelyabinsk: Metallurgy Publ., 1988, 432 p.

³Худяков И.Ф., Тихонов В.И., Деев В.И., Набойченко С.С. Металлургия меди, никеля и кобальта: учеб. пособие; в 2 ч.; 2-е изд., перераб. и доп. М.: Metallurgy, 1977. Ч 1. Металлургия меди – 296 с. Ч. 2. Металлургия никеля и кобальта – 262 с. / Khudyakov I.F., Tikhonov V.I., Deev V.I., Naboichenko S.S. Metallurgy of copper, nickel and cobalt: Learning aids; in 2 parts; 2nd edition, enlarged and revised. Moscow: Metallurgy Publ., 1977. Part 1. Metallurgy of copper – 296 p. Part 2. Metallurgy of nickel and cobalt – 262 p.



Оборудование, материалы и методика проведения экспериментов

Исследования проводились с использованием лежалого отвального никелевого шлака Южно-Уральского никелевого комбината (г. Орс, Оренбургская обл.). Усредненный химический состав, полученный путем анализа пяти проб шлака, приведен в табл. 1.

Анализ строения шлака и его химического состава проводился электронно-микроскопическими исследованиями, рентгенофлуоресцентным анализом и анализом фазового состава.

Электронно-микроскопические исследования проведены на сканирующем электронном микроскопе Jeol JSM-7001F. Поверхность исследовалась в режиме вторичных и отраженных электронов. Рентгенофлуоресцентный анализ осуществляли с помощью энергодисперсионного спектро-

метра Oxford INCA X-mail80, который смонтирован на микроскопе Jeol JSM-7001F. Исследование фазового состава проведено с помощью рентгеновского дифрактометра Rigaku Ultima IV.

Шлак и кокс измельчались в мельнице истирания модели ИДА-175 Уфимского производства (рис. 1) до фракции -0,16 мм (основная часть – на калибровочном сите). Используемый хлористый аммоний предварительной подготовки не требовал.

Реакционная шихта для обжига состояла из шлака (88%), хлористого аммония (2%) и кокса (10%). Обжиг проводился при температуре 1000°C в течение 1–8 ч в лабораторной установке, спроектированной на базе нагревательной трубчатой печи СУОЛ, схема которой приведена на рис. 2.

Таблица 1

Состав размолотого и усредненного шлака, % масс.

Table 1

Composition of ground and averaged slag, % weight

O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
42,13	0,38	4,90	2,89	17,78	0,76	8,28	0,12	0,80	0,29	20,87	0,21	0,36	0,20



Рис. 1. Истирающая машина модели ИДА-175
Fig. 1. Abrasive machine of IDA-175 model

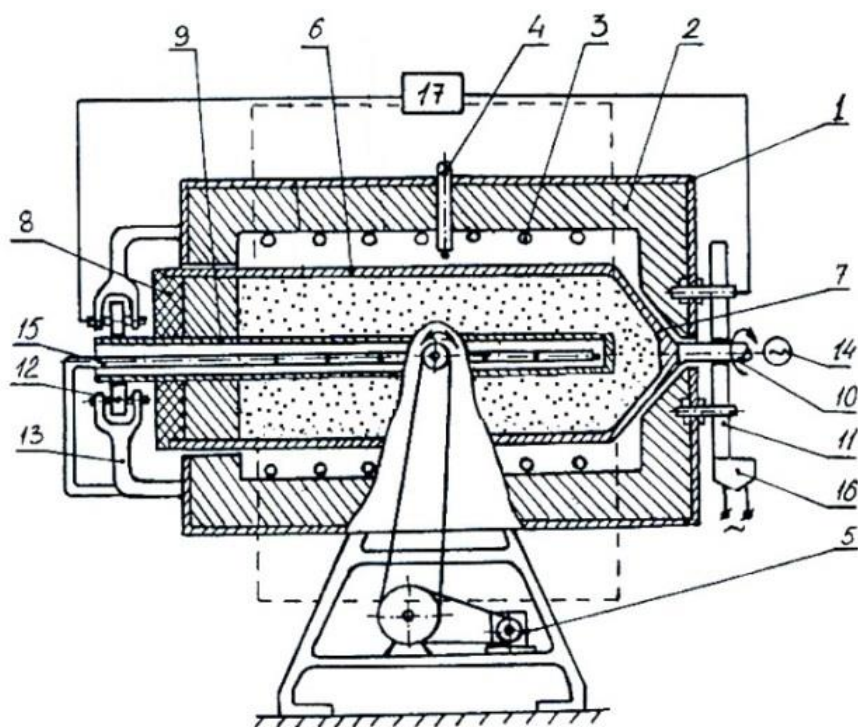


Рис. 2. Установка для проведения хлорирующего обжига шлака:

1 – камера нагрева; 2 – цилиндрический муфель; 3 – электронагреватель; 4 – датчик температуры; 5 – механизм поворота; 6 – реторта; 7 и 8 – передняя и задняя крышки; 9 – глухондонная гильза; 10 – вал; 11 и 12 – передние и задние катки; 13 – изолятор; 14 – привод; 15 – датчики температуры; 16 – вибратор; 17 – источник питания

Fig. 2. Installation for chloridizing roasting of slag:

1 – heating chamber; 2 – cylindrical muffle; 3 – electric heater; 4 – temperature sensor; 5 – rotation mechanism; 6 – retort; 7 and 8 – front and rear covers; 9 – closed bottom liner; 10 – shaft; 11 and 12 – front and rear rollers; 13 – insulator; 14 – drive; 15 – temperature sensors; 16 – vibrator; 17 – power supply

Работа установки происходит следующим образом. Камера нагрева 1 с цилиндрическим муфелем 2, электронагревателем 3 и датчиком температуры 4 с помощью механизма поворота 5 устанавливается в вертикальное положение (пунктирные линии на рис. 2), при расположении реторты 6 передней крышкой вниз (при снятой задней крышке 8). Реакционная шихта заполняет 90–95% объема реторты 6 для возможности перемешивания при вращении в период нагрева. Затем реторта 6 закрывается задней крышкой 8. Камера нагрева 1 с помощью механизма поворота 5 приводится в горизонтальное положение. Вал 10 реторты 6 приводится во вращение приводом 14 с частотой вращения 3–10 об./мин. Внешний нагрев реторты 6 осуществляется от муфеля 2 электронагрева-

телем 3, запитываемым от регулируемого трансформатора. Контроль температурного режима обработки проводится датчиками температуры 4, установленными на муфеле 2 камеры нагрева 1 и дополнительными датчиками 15, размещенными в гильзе 9.

При наложении низкочастотных колебаний от вибратора 16 на реторту 6 через передние катки 11 или их оси в ней, дополнительно к перемешиванию при вращении, возникает виброкипящий слой. Виброожижение осуществляется с частотой в диапазоне 15–25 Гц и амплитудой 1–3 мм в режиме подбрасывания.

После проведения экзотермической выдержки реторта остывала вместе с печью до температуры ниже 100°C, раскрывалась и проводились дальнейшие исследования.



Результаты и их обсуждение

По полученным картам распределения элементов в отвальном никелевом шлаке, представленным на рис. 3, 4, и данным о его составе (табл. 2) можно судить о равномерном распределении никеля по всей площади исследуемого образца (см. рис. 3). Наиболее крупные включения никеля имеют идентичное местоположение с распределением серы, свидетельствуя о сульфидных включениях типа $(\text{Fe}, \text{Ni})\text{S}$. Данные включения представляют собой частички никелевого штейна, застрявшие в шлаке при его кристаллизации (см. рис. 4). Более мелкое распределение никеля относится к ферритам.

Результаты рентгеновского фазового анализа в графической интерпретации представлены на рис. 5.

Рентгенограмма, представленная на рис. 5, позволяет выделить следующие ос-

новные фазы: 1 – фазу диопсида $\text{CaMgSi}_2\text{O}_4$ (35,5 % масс.), частично замещенного магнием фаялита $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$ (12% масс.); 2 – фазу кварца SiO_2 (2,5% масс.); 3 – большое количество аморфного стекловидного шлака (50% масс.). Это согласуется с данными картирования. Никель в шлаке представлен фазой $(\text{Fe}, \text{Ni})\text{S}$, которая присутствует в малом количестве в виде отдельных включений, попавших в основной шлак механическим путем, и не может быть достоверно определена. Соотношение $\text{Fe}:\text{Ni}$ в представленных на картах зернах составляет от 1:1 до 5:1. Часть никеля находится в окисленной форме в виде ферритов (рис. 6). Кобальт преимущественно распределен в оксидной части шлака в виде ферритов и хромитов, хром присутствует в виде хромитов и оксидов.

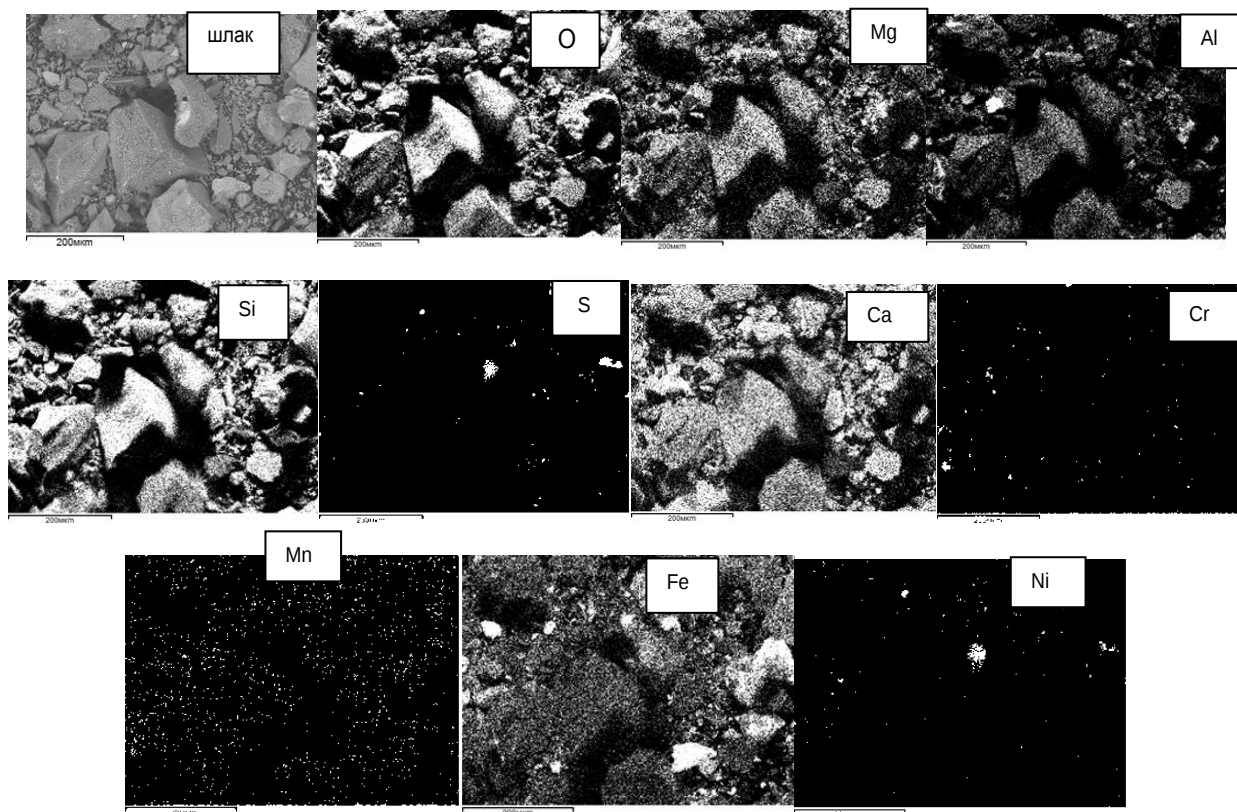


Рис. 3 Карты распределения элементов в шлаке на площади 300×400 мкм
Fig. 3 Maps of element distribution in slag on the area of 300×400 μm

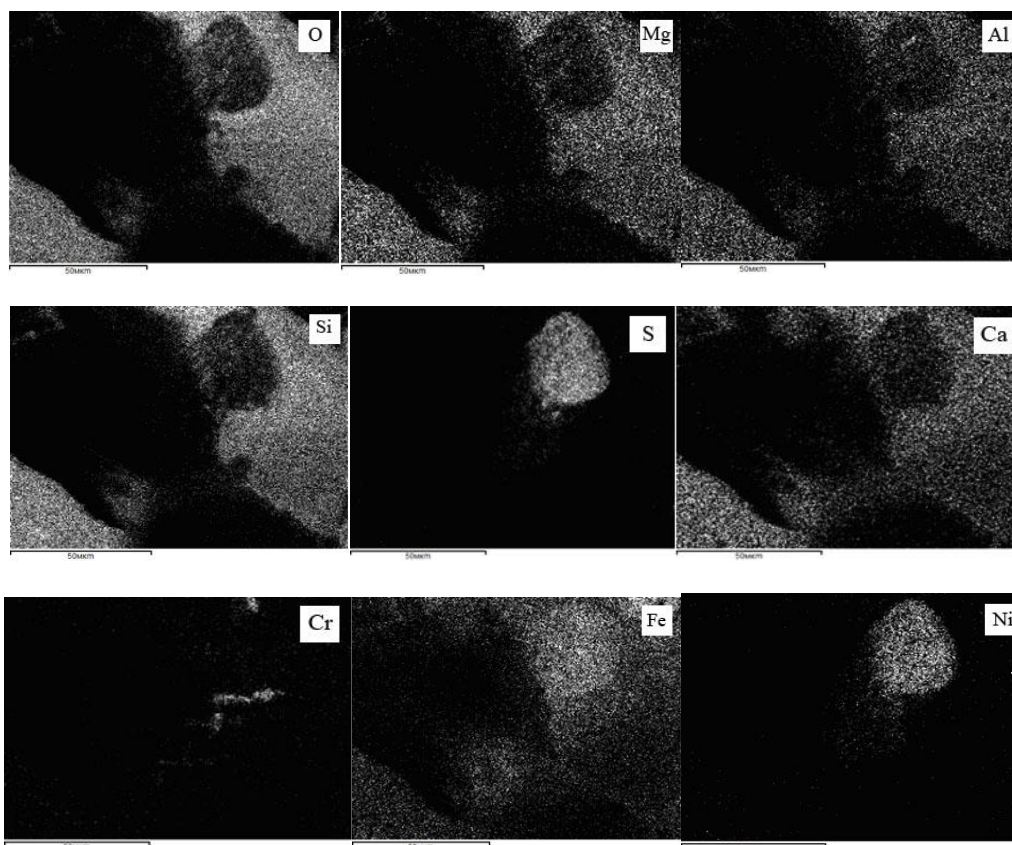


Рис. 4. Никельсодержащее включение в шлаке (100×120 мкм)
Fig. 4. Nickel-containing inclusion in slag (100×120 µm)

Таблица 2

Состав никельсодержащего включения

Table 2

Composition of nickel-containing inclusion

O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu
33,40	1,12	2,95	2,05	9,02	13,69	2,44	0,04	0,98	0,08	18,34	0,53	15,46	0,29

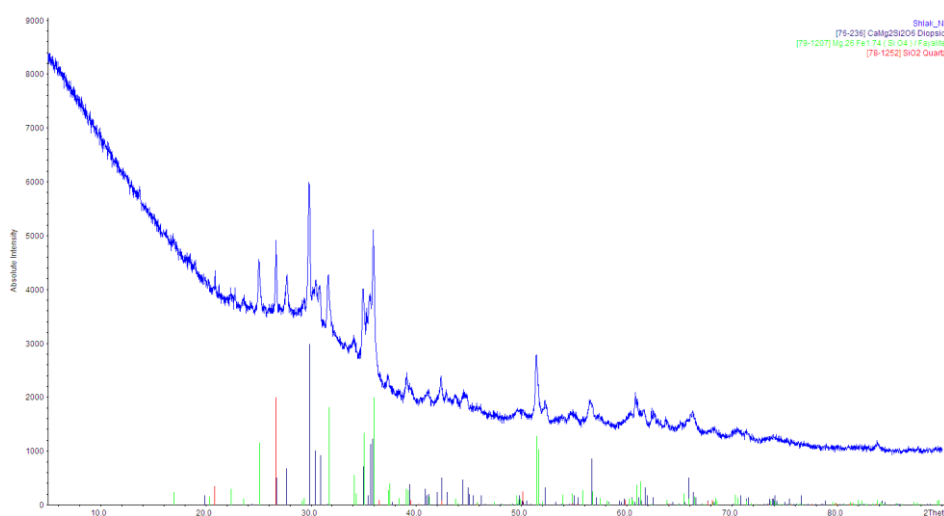


Рис. 5. Отнесение пиков рентгенограммы к трем основным фазам
Fig. 5. Reference of x-ray diffraction peaks to three main phases



На основании проведенных анализов отвального никелевого шлака можно заключить, что в отвальном никелевом шлаке содержание никеля в среднем составляет 0,36 % масс. Основная часть никеля входит в состав сульфидных фаз с участием железа типа (Fe,Ni)S, остальной никель – в феррите. Данные фазы являются мелкими каплевидными вкраплениями размером от 10 до 100 мкм в массе стекло-видного шлака. Поэтому для вскрытия вкраплений такого рода с целью их извлечения необходим тонкий помол всего шлака.

Восстановительная плавка такого шлака без обогащения позволит получить

чугун с содержанием никеля 1–2 % масс. Такое направление использования отвального никеля экономически невыгодно из-за низкой стоимости самого чугуна.

Входящий в состав реакционной смеси хлористый аммоний, начиная с температуры 350°C разлагается с выделением хлороводорода, а последний при более высоких температурах диссоциирует с выделением свободного хлора. Кокс, восстанавливая железо, создает искусственные центры осаждения галогенидного никеля и кобальта, в то же время он является катализатором химических процессов, протекающих в реакционной смеси⁴:

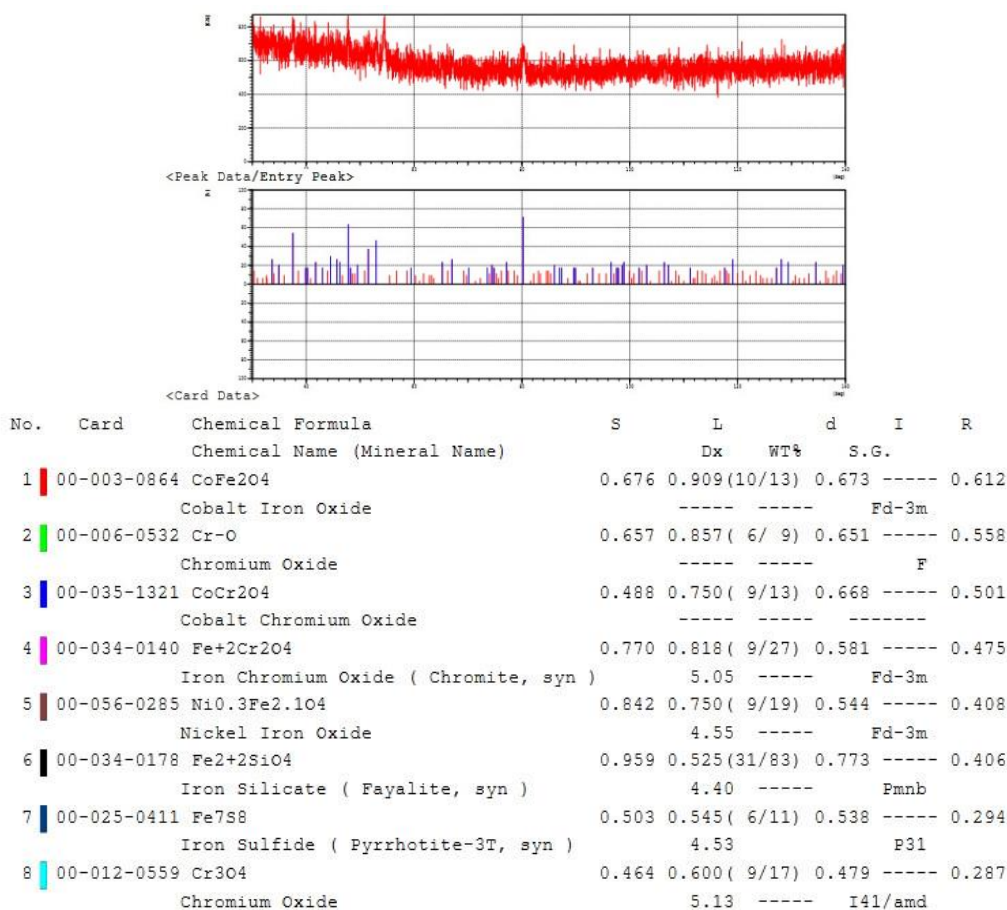
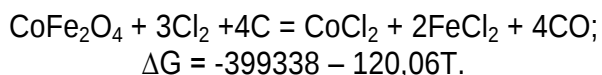
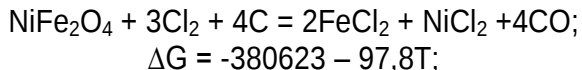
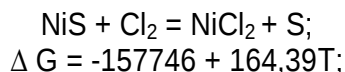
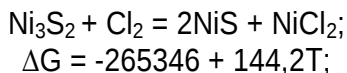


Рис. 6. Рентгенограмма аморфной составляющей никелевого отвального шлака
Fig. 6. X-ray diffraction pattern of amorphous component of nickel dump slag

⁴Имидеев В.А. Исследование и разработка комбинированного способа переработки сульфидных никелевых концентратов с получением гидроксида никеля: дисс. ...канд. техн. наук; 05.16.02. Москва, 2015. 143 с. / Imideev V.A. Research and development of a combined method for processing sulfide nickel concentrates to produce nickel hydroxide: Candidate's Dissertation in technical sciences; 05.16.02. Moscow, 2015. 143 p.



Полученный в результате реакций разложения ферритов СО также способен в присутствии хлора, подобно углероду, участвовать в реакциях образования галогенидов. Использование кокса без хлористого аммония позволит восстановить железо из оксидов и разложить ферриты, содержащие в себе никель. Но никель, содержащийся в сульфидах, углеродом не восстанавливается, а учитывая, что количество оксидных и сульфидных фаз никеля в отвальных шлаках находится приблизительно в равных долях, то половина его будет возвращена в отвал [8, 9].

Восстановленные и легированные

железные включения после химико-термической обработки (ХТО) извлекаются в магнитный концентрат магнитной сепарацией. Анализ металлических составляющих в шлаке после ХТО показывает, что включения белого цвета (рис. 7) представляют собой ферроникель с содержанием 1,5–19,8% никеля, 0,8–2% кобальта и до 0,4% серы (табл. 3).

Для оценки влияния факторов времени и количества кокса, используемого в шихте, на выход магнитного концентрата после ХТО и на количество никеля, перешедшего в металлический продукт, были проведены эксперименты при постоянном значении одного управляющего параметра и переменном значении другого. Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 8 и 9.

Увеличение количества кокса в шихте уменьшает процент никеля в металлопродукте (рис. 9, б), что связано с процессом одновременного восстановления железа из оксидов. Аналогично влияет время обработки при наличии достаточного количества кокса в шихте [10].

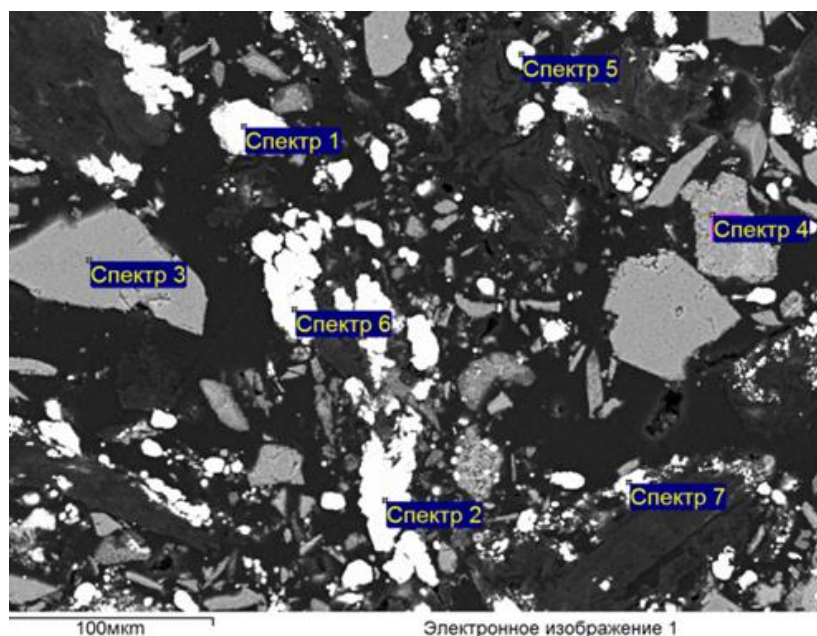


Рис. 7. Металлическая фаза в магнитном концентрате (2% NH_4Cl , 10% кокс, остальное-шлак) нагрева и выдержки при температуре 1000°C в течение 1 ч:

1 – корольки ферроникеля; 2 – кокс

Fig. 7. Metallic phase in magnetic concentrate (2% NH_4Cl , 10% coke, the rest is slag) of heating and aging at a temperature of 1000 °C for 1 hour: 1 – ferronickel shots; 2 – coke



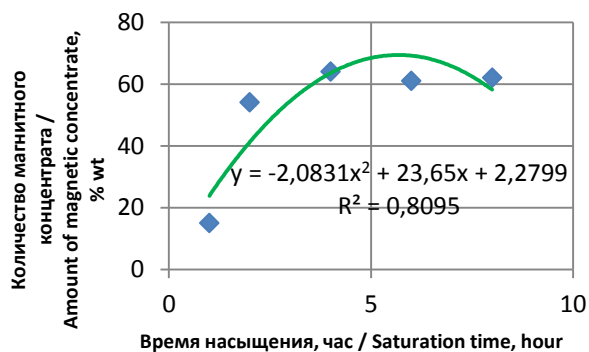
Таблица 3

Химический состав структурных составляющих шлака после ХТО

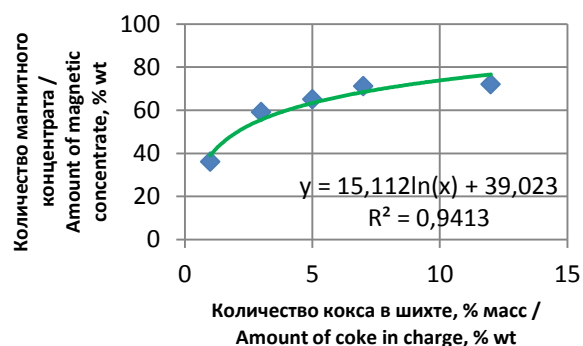
Table 3

Chemical composition of structural components of slag after thermochemical treatment

Номер спектра / Spectrum no.	Химический состав, % масс. / Chemical composition, % wt									
	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Cr	Fe	Co	Ni
1	1,3	0	0,1	0,2	0,2	0,1	0	76,7	2,0	19,8
2	1,6	0	0	0,2	0,3	0,1	0	95,8	0,8	1,9
3	42,7	7,0	3,3	21,0	0	13,9	0,5	11,4	0,1	0,1
4	40,2	4,7	3,4	20,9	0,4	11,7	1,2	17,2	0,1	0,1
5	1,0	0,1	0	0,1	0,3	0,1	0	96,5	0,9	1,5
6	1,3	0	0	0,2	0,2	0	0	96	1,0	1,7
7	2,6	0,4	0,1	0,3	0,3	0,1	0,1	94,4	0,8	1,7

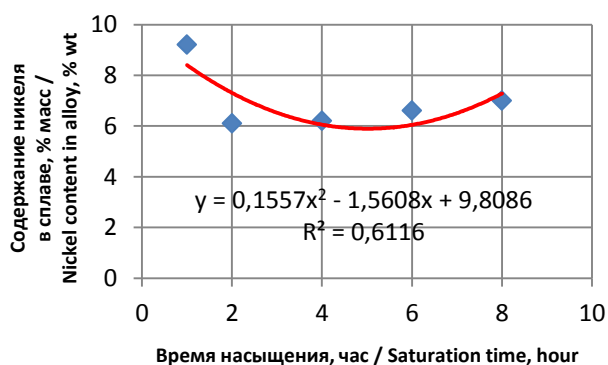


a

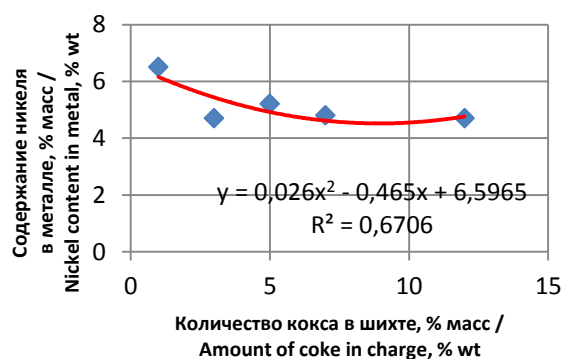


b

Рис. 8. Влияние времени насыщения (a) и количества кокса в шихте (b) на выход магнитного концентрата при: 10 % масс. кокса в шихте (a); времени ХТО – 2 часа (b)
Fig. 8. Influence of saturation time (a) and the amount of coke in charge (b) on magnetic concentrate yield at: (a) 10% wt of coke in the charge; (b) - time of thermochemical treatment of 2 hours



a



b

Рис. 9. Влияние времени ХТО при 10 % масс. кокса в шихте (a) и количества кокса в шихте при 2-х часовой обработке (b) на содержание никеля в металлическом продукте
Fig. 9. Influence of time of thermochemical treatment at 10 wt.% of coke in charge (a) and the amount of coke in charge at 2-hour treatment (b) on nickel content in metal product



Степень извлечения отвального никеля в магнитный концентрат достигает 80–85%, кобальта – почти 100%, а при последующем переплаве никель и кобальт практически полностью переходят в расплав. Выход годного магнитного концентрата представлен в табл. 4. Состав полученного

сплава от переплава магнитного концентрата, полученного после ХТО отвального шлака при содержании кокса 10% и времени ХТО 2–8 ч, представлен в табл. 5, а шлака от переплава магнитного концентрата – в табл. 6.

Таблица 4

Состав шихты и выход годного магнитного концентрата

Table 4

Charge composition and yield of commercial magnetic concentrate

Шихта для ХТО, % масс. / Charge for thermochemical treatment, % wt			Температура, °C / Temperature, °C	Выдержка, ч / Ageing, hour	Концентраты после сепарации, % масс. / Concentrates after separation, % wt	
Шлак / Slag	NH ₄ Cl	Кокс / coke			магнитный / magnetic	немагнитный / nonmagnetic
88	2	10	1000	1	15	85
88	2	10	1000	2	69	31
88	2	10	1000	4	64	36
88	2	10	1000	6	54	46
88	2	10	1000	8	62	38

Таблица 5

Химический состав и выход годного ферроникеля, полученного от переплава магнитного концентрата

Table 5

Chemical composition and yield of commercial ferronickel obtained from magnetic concentrate remelting

Номер опыта / Test no.	Шихта, % масс. / Charge, wt. %		Т, °C	ВГ, %	Химический состав ферроникеля, % масс. / Chemical composition of ferronickel, wt. %					
	Конц / end	Кокс / coke			Cr	Ni	S	Si	Co	Fe
1	99	1	1550	34	0,8	9,2	3,0	3,0	0,8	Ост. / residue
2	99	1	1550	28	1,0	6,1	1,7	4,3	0,7	Ост. / residue
3	99	1	1550	27	1,1	6,2	1,8	3,4	0,9	Ост. / residue
4	99	1	1550	32	1,9	6,2	4,5	6,0	0,8	Ост. / residue
5	99	1	1550	34	1,2	7,0	4,2	3,0	0,7	Ост. / residue



Таблица 6

Химический состав шлака, полученного от переплава магнитного концентрата

Table 6

Chemical composition of slag obtained from magnetic concentrate remelting

Номер опыта / Test no.	Химический состав, % масс / Chemical composition, % wt						
	O	Al	Si	Ca	Mn	Fe	Ni
1	54,12	15,44	20,82	7,93	0,28	0,08	0,09
2	53,96	18,29	19,38	8,05	0,16	0,1	0,08
3	53,75	15,21	21,62	8,95	0,26	0,11	0,10
4	53,51	20,18	18,20	7,86	0,28	0,00	0,00
5	52,89	20,70	17,16	8,99	0,15	0,08	0,03

Шлак от переплава магнитного концентрата (см. табл. 6) представляет собой очищенную от железа и никеля пустую породу в виде стекловидной фазы.

Сера в полученном ферроникеле сосредотачивается по границам зерен в виде легкоплавких эвтектик на базе суль-

фидов железа, в которых растворено большое количество (в сравнении с основной металла) хрома и меди, диффундирующих при ХТО совместно с никелем. Содержание серы в готовом ферроникеле не зависит от содержания кокса в шихте (рис. 10, табл. 7).

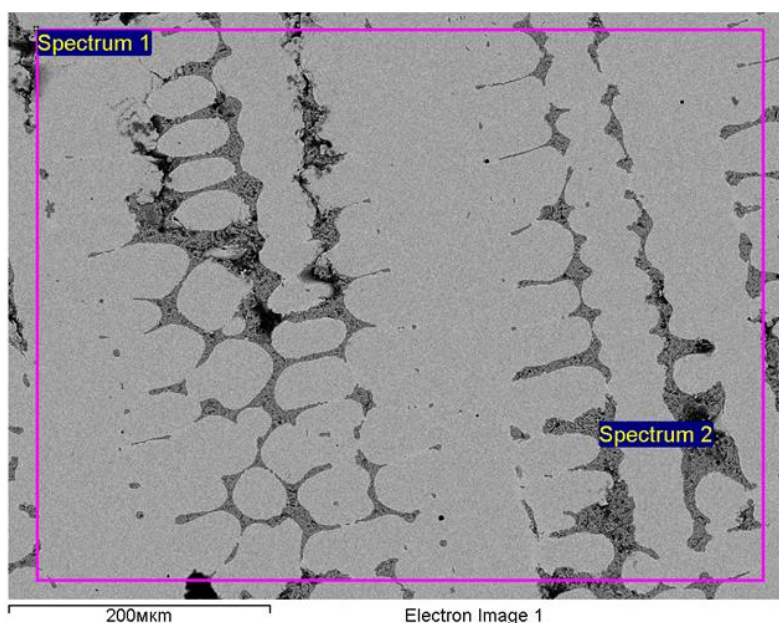


Рис. 10. Распределение серы в ферроникеле

Fig. 10. Sulphur distribution in ferronickel

Таблица 7

Химический состав анализируемых точек, % масс.

Table 7

Chemical composition of the analyzed points, % wt

Спектр / Spectrum	O	Si	S	Cr	Fe	Co	Ni	Итого / Total
1	–	1,1	5,1	0,8	85,5	1,0	6,5	100
2	7,1	–	35,4	2,5	54,0	0,4	0,6	100



Повышенное содержание серы в готовом ферроникеле связано с попаданием в магнитный концентрат пустой породы, увлекаемой в металлопродукт из-за застрявших в ней металлических вкраплений, а также ввиду того, что восстановление оксидов железа начинается с периферии зерен фракционного состава шлака [11]. Такое зерно может быть увлечено магнитными силами в металлопродукт. Все это способствует дополнительному перемещению серосодержащих включений в магнитный концентрат, а при последующем расплавлении последнего легкоплавкие сульфидные соединения переходят в металл.

С целью установления рациональных значений управляющих параметров, позволяющих получить максимальные или близко к тому значения выходных параметров, характеризующих полноту и качество проведенных технологических процессов, была проведена математическая обработка экспериментальных данных. Для установления полной картины функциональных взаимосвязей были дополнительно проведены эксперименты, в которых предпола-

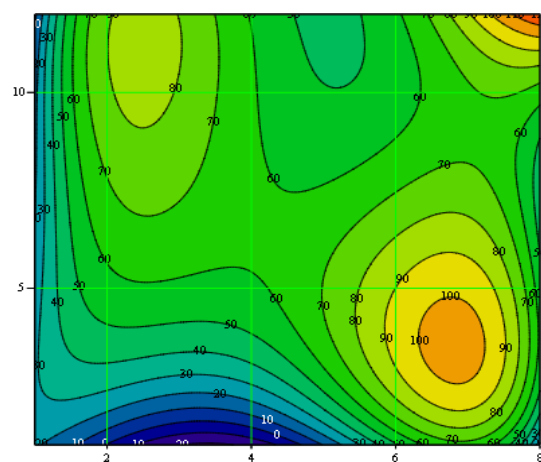
галось варьирование времени насыщения и количества кокса в шихте, температура процесса ХТО и переплава во всех случаях оставалась постоянной.

Регрессионным анализом установлена адекватная зависимость выхода магнитного концентрата Y от времени насыщения X_1 и количества кокса в шихте X_2 . Наиболее адекватно экспериментальные данные описывает полином четвертой степени:

$$Y = 28,469 + 4,215X_1 - 16,023X_2 - 34,741X_1^2 - 3,358X_2^2 + 41,853X_1X_2 - 7,467X_1^2X_2 - 2,178X_1X_2^2 + 9,699X_1^3 + 0,513X_2^3 + 0,059X_1X_2^3 + 0,128X_1^2X_2^2 + 0,423X_1^3X_2 - 0,692X_1^4 - 0,021X_2^4. \quad (2)$$

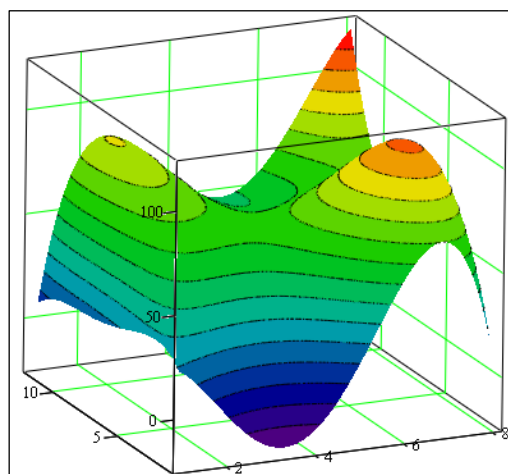
Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рис. 11.

Зависимость содержания никеля в ферроникеле от количества кокса в шихте и времени насыщения адекватно описывает полином третьей степени (рис. 12):



FR

a



FR

b

Рис. 11. Плоский (a) и пространственный (b) виды поверхности отклика зависимости количества магнитного концентрата (% масс.), полученного магнитной сепарацией шлака после ХТО, от времени обработки, ч (ось абсцисс), и содержания кокса, % масс., в шихте (ось ординат)

Fig. 11. Flat (a) and spatial (b) views of the response surface of the dependence of magnetic concentrate amount (wt.%) obtained by slag magnetic separation after thermochemical treatment on the treatment time (hours) (x-axis) and coke content (% mass.) in charge (y-axis)



$$Y = 6,942 + 0,612X_1 - 2,888X_2 + 0,184X_1^2 + 1,127X_2^2 - 0,679X_1X_2 + 0,02X_1^2X_2 + 0,047X_1X_2^2 - 0,015X_1^3 - 0,099X_2^3 \quad (3)$$

Анализ полученных результатов (см. рис. 11) позволяет выделить три теоретических экстремума-максимума величины (количества) магнитного концентрата от времени насыщения X_1 и количества кокса в шихте X_2 :

- $X_1 = 2,48$ ч.; $X_2 = 11,26\%$; $Y = 85,20\%$;
- $X_1 = 6,87$ ч.; $X_2 = 3,57\%$; $Y = 100\%$;
- $X_1 = 8$ ч.; $X_2 = 12\%$; $Y = 100\%$.

Экстремальные значения здесь достигаются либо увеличением содержания кокса в шихте (X_2) при низком значении времени насыщения, либо наоборот – длительной выдержкой при ХТО (X_1) и низким значением содержания кокса в шихте. Третий экстремум образован сочетанием максимальных управляющих параметров (X_1 и X_2), но на практике из-за экономических соображений такое сочетание применять не рекомендуется.

Теоретический экстремум количе-

ства никеля Y в ферроникеле определялся полиномами второй, третьей и четвертой степеней (см. рис. 12). Сравнение полученных результатов, предсказанных различными моделями, выявило близость координатных точек между собой, причем время насыщения во всех случаях одинаково, а содержание кокса незначительно различается между собой:

$$X_1 = 1,0 \text{ ч}; X_2 = 7,7\text{--}9,03\%; \\ Y = 8,38\text{--}11,91\%.$$

Сравнение экстремальных результатов управляющих параметров и степени их влияния на выход магнитного концентрата и содержание никеля в ферроникеле позволило заключить, что, ограничивая время химико-термической обработки до 1 ч, можно добиться высоких значений концентрации никеля в получаемом ферроникеле. Последующее увеличение времени выдержки увеличивает выход годного магнитного концентрата за счет прироста восстановленного железа, снижая при этом процент никеля в готовом металлопродукте.

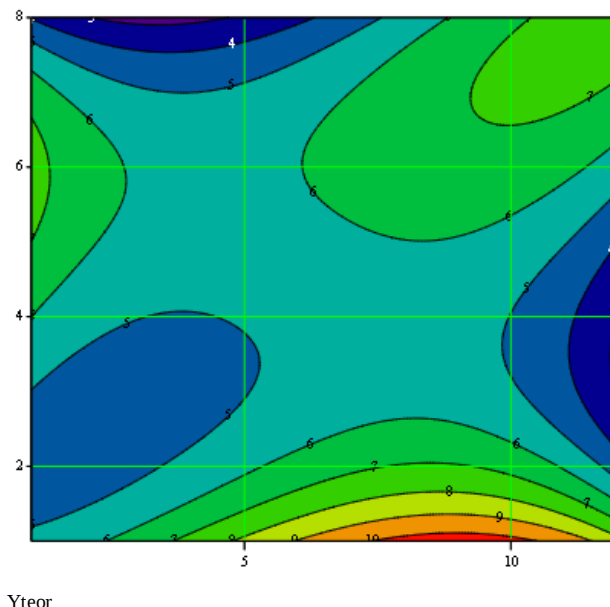


Рис. 12. Пространственный вид поверхности отклика зависимости содержания никеля, % масс., полученного переплавом магнитного концентрата от содержания, % масс., кокса в шихте (ось абсцисс) и времени (ч) ХТО (ось ординат)

Fig. 12. Spatial view of the response surface of the dependence of nickel content, % wt obtained by magnetic concentrate remelting on the coke content in charge, % wt (x-axis) and time (hour) of thermochemical treatment (y-axis)



Заключение

1. Фазовым анализом отвальных никелевых шлаков установлено, что шлак состоит из диопсида ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$) – 35,5 % масс.; фаялита, частично замещенного магнием – $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ – 12 % масс.; кварца – 2,5 % масс. Остальное – стекловидный шлак, где большая часть никеля находится в сульфидной фазе $(\text{Fe,Ni})\text{S}$, оставшийся никель – в феррите. Кобальт преимущественно находится в оксидной форме.

2. Спроектирован химический процесс и подобраны реагенты для разложения никель- и кобальтсодержащих фаз с образованием летучих галогенидов, осаждающихся на включениях восстановленного металлического железа с выделением никеля или кобальта в свободном виде. Последующая диффузия легирует стальную подложку, а магнитной сепарацией по-

сле такой химико-термической обработки легированные железные включения извлекаются в магнитный концентрат.

3. В ходе проведенных экспериментов установлено, что для достижения максимального содержания никеля (8–12%) в конечном продукте – ферроникеле, необходимо при химико-термической обработке вводить 7,5–9% кокса, а время ограничить до одного часа.

4. Предлагаемый способ доизвлечения никеля и кобальта из отвальных шлаков никелевых производств позволяет извлекать, используя недорогие реагенты (отсев кокса и хлористый аммоний) и обогатование, до 80–85% отвального никеля и почти 100% отвального кобальта в конечный металлопродукт – ферроникель.

Библиографический список

1. Стрельцов Ф.Н., Задиранов А.Н. Повышение эффективности переработки шлаков на заводах ОЦМ // Цветные металлы. 1993. № 1. С. 61–64.
2. Худяков И.Ф., Дорошкевич А.П., Карелов С.В. Комплексное использование сырья при переработке ломов и отходов цветных металлов. М.: Metallurgia, 1985. 158 с.
3. Голованов Д.В., Савченко В.П. Перспективы использования вибрационной техники // Цветная металлургия. 1993. № 4. С. 28–31.
4. Кравченко Н.А. Магнитная сепарация отходов цветной металлургии. М.: Metallurgia, 1986. 118 с.
5. Анализ техногенного рассеяния благородных металлов в Норильском промышленном регионе: отчет (заключ.) / Норильский индустриальный институт; рук. Л.К. Говорова; исполн.: Т.Н. Томилина, Л.К. Говорова, Т.А. Макарова [и др.]. Норильск, 1995. 152 с.
6. Пат. 2621496, Российская Федерация, МПК C22B7/04, C22B23/00. Способ переработки окисленных никелевых руд и отвальных никелевых шлаков химико-термической обработкой / А.А. Веселовский; заявитель и патентообладатель А.А. Веселовский. № 2015122088; заявл. 09.06.2015, опубл. 06.06.2017. Бюл. 16.

7. Соколов А.Г. Артемьев В.П., Чалов А.А. Исследование защитных свойств никельсодержащих диффузионных покрытий, получаемых при диффузионной металлизации стальных изделий в сероводородных средах // Нефтегазовое дело. 2006. № 2. С. 14–22.
8. Veselovskii A.A. Recovery of nickel from discarded slag formed during blast roasting at the yozhuralnickel factory // Metallurgist. 2015. Vol. 59. No. 5-6. P. 461–465.
9. Веселовский А.А. Переработка отвальных никелевых шлаков с извлечением никеля и железа хлорсодержащими реагентами // Обогащение руд. 2017. № 6. С. 38–45.
10. Веселовский А.А., Рошин В.Е., Лайхан С.А. Химико-термическая обработка отвальных никелевых шлаков с целью извлечения никеля и железа // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2017. Т. 17. № 4. С. 22–30.
11. Crundwell F.K., Moats M.S., Ramachandran V., Robinson T.G., Davenport W.G. Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals. Oxford: Elsevier, 2011. 610 p.

References

1. Strel'tsov F.N., Zadiranov A.N. Improving slag processing efficiency at non-ferrous metals working plants. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 1993, no. 1, pp. 61–64. (In Russian).
2. Khudyakov I.F., Doroshkevich A.P., Karelov S.V.

Kompleksnoe ispol'zovanie syr'ya pri pererabotke lomov i otkhodov tsvetnykh metallov [Complex use of raw materials under recycling of scrap and non-ferrous metal waste]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1985, 158 p. (In Russian).



3. Golovanov D.V., Savchenko V.P. Application prospects of vibration technology. *Tsvetnaya metallurgiya* [Non-Ferrous Metallurgy]. 1993, no. 4, pp. 28–31. (In Russian).
4. Kravchenko N.A. *Magnitnaya separatsiya otkhodov tsvetnoi metallurgii* [Magnetic separation of non-ferrous metallurgy wastes]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1986, 118 p. (In Russian).
5. *Analiz tekhnogenogo rasseyaniya blagorodnykh metallov v Noril'skom promyshlennom regione: otchet / Noril'skii industrial'nyi institut; ruk. L.K. Govorova; ispolniteli: T.N. Tomilina, L.K. Govorova, T.A. Makarova [et al.]* [Analysis of technogenic scattering of precious metals in the Norilsk industrial region: report (conclusion) / Norilsk Industrial Institute; Supervisor L.K. Govorova; Executives: T.N. Tomilina, L.K. Govorova, T.A. Makarova [et al.]]. Noril'sk, 1995, 152 p. (In Russian).
6. Veselovskii A.A. *Sposob pererabotki okislennykh nikelevykh rud i otval'nykh nikelevykh shlakov khimiko-termicheskoi obrabotkoi* [Processing method of oxidized nickel ores and nickel dump slag of thermochemical treatment]. Patent RF, no. 2621496, 2017.
7. Sokolov A.G. Artem'ev V.P., Chalov A.A. Protective

Критерии авторства

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

Конфликт интересов

Веселовский А.А. заявляет об отсутствии конфликта интересов.

property study of nickel-containing diffusion coatings obtained under diffusion metallization of steel products in hydrogen sulfide media. *Neftegazovoe delo* [Oil and Gas Business]. 2006, no. 2, pp. 14–22. (In Russian).

8. Veselovskii A.A. Recovery of nickel from discarded slag formed during blast roasting at the yozhuralnickel factory. *Metallurgist*. 2015, vol. 59, no. 5-6, pp. 461–465.
9. Veselovskii A.A. Processing of nickel-containing final dump slags with recovery of nickel and iron by chlorine-containing reagents. *Obogashchenie rud* [Mineral Processing]. 2017, no. 6, pp. 38–45. (In Russian).
10. Veselovskii A.A., Roshchin V.E., Laikhan S.A. Chemical heat treatment of dumped nickel slags to recover nickel and iron. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2017, vol. 17, no. 4, pp. 22–30. (In Russian).
11. Crundwell F.K., Moats M.S., Ramachandran V., Robinson T.G., Davenport W.G. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt and Platinum-Group Metals*. Oxford: Elsevier, 2011, 610 p.

Authorship criteria

Veselovsky A.A. has conducted the research, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

Veselovsky A.A. declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 66.074.9:669.015.7

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-209-219>

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ КОНСТРУКЦИИ «СУХОЙ» ГАЗООЧИСТНОЙ УСТАНОВКИ

© А.В. Книжник¹, В.Г. Григорьев², А.Б. Ключанцев³, С.В. Тепикин⁴, А.П. Пьянкин⁵,
М.П. Кузьмин⁶, А.А. Кузаков⁷, А.Д. Шемет⁸, Д.В. Высотский⁹

^{1,2,4,5,8,9}Акционерное общество «Сибирский научно-исследовательский, конструкторский и проектный институт алюминиевой и электродной промышленности» (АО «СибВАМИ»),
664007, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Советская, 55.

³Общество с ограниченной ответственностью «Объединенная компания РУСАЛ.

Инженерно-технологический центр (ООО «РУСАЛ ИТЦ»),

660111, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Пограничников, 37, стр. 1.

^{2,6}Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

⁷Обособленное подразделение АО «СибВАМИ» в г. Красноярске,

660127, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. 9 Мая, 2д.

РЕЗЮМЕ. В АО «СибВАМИ» разработана газоочистная установка сухого типа (СГОУ), в основе технической концепции которой заложена модульная конструкция газоочистной установки. Входящие в ее состав реактор-

¹Книжник Алексей Владимирович, кандидат химических наук, главный специалист отдела технологического проектирования, e-mail: a-kni@yandex.ru

Aleksey V. Knizhnik, Candidate of Chemistry, Chief Specialist of the Process Design Department, e-mail: a-kni@yandex.ru

²Григорьев Вячеслав Георгиевич, кандидат технических наук, генеральный директор АО «СибВАМИ», заведующий базовой лабораторией металлургии легких металлов ИРНТУ, e-mail: Vyacheslav.Grigoriev2@rusal.com

Vyacheslav G. Grigoriev, Candidate of technical sciences, CEO of Siberian Research Development and Design Institute of Aluminum and Electrode Industry JSC, Head of the Basic Laboratory of the Light Metal Metallurgy at INRTU, e-mail: Vyacheslav.Grigoriev2@rusal.com

³Ключанцев Андрей Борисович, главный специалист отдела моделирования и измерений, e-mail: Andrey.Klyuchantsev@rusal.com

Andrey B. Klyuchantsev, Chief specialist of the Department of Modeling and Measurements, e-mail: Andrey.Klyuchantsev@rusal.com

⁴Тепикин Сергей Викторович, технический директор – директор департамента проектирования, e-mail: Sergey.Tepikin@rusal.com

Sergey V. Tepikin, Chief Technology Officer – Director of the Design Department, e-mail: Sergey.Tepikin@rusal.com

⁵Пьянкин Алексей Павлович, начальник отдела технологического проектирования, e-mail: Aleksey.Piyankin@rusal.com

Aleksey P. Piyankin, Head of the Process Design Department, e-mail: Aleksey.Piyankin@rusal.com

⁶Кузьмин Михаил Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов, научный сотрудник инновационно-технологического центра, e-mail: mike12008@yandex.ru

Mikhail P. Kuzmin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy, Researcher of the Innovation and Technology Centre, e-mail: mike12008@yandex.ru

⁷Кузаков Александр Алексеевич, директор департамента проектирования, e-mail: Aleksandr.Kuzakov@rusal.com

Aleksandr A. Kuzakov, Head of the Design Department, e-mail: Aleksandr.Kuzakov@rusal.com

⁸Шемет Алексей Дмитриевич, ведущий инженер-проектировщик отдела проектирования газоочистных сооружений и производства фтористых солей, e-mail: Aleksey.Shemet@rusal.com

Aleksey D. Shemet, Leading Design Engineer of the Design Department of Gas Treatment Facilities and Fluoride Salt Production, e-mail: Aleksey.Shemet@rusal.com

⁹Высотский Дмитрий Владимирович, начальник отдела проектирования газоочистных сооружений и производства фтористых солей, e-mail: Dmitry.Vysotskiy@rusal.com

Dmitry V. Vysotskiy, Head of the Design Department of Gas Treatment Facilities and Fluoride Salt Production, e-mail: Dmitry.Vysotskiy@rusal.com



адсорбер и рукавный фильтр обеспечивают высокий уровень очистки отходящих газов электролизного производства и возвращают соединения фтора, адсорбированные из этих отходящих газов, в технологический процесс электролитического получения алюминия. Вентилятор обеспечивает движение газов по всем участкам газового тракта СГОУ. Минимизация сопротивления на этих участках позволяет обеспечить перепад давления, достаточный для эффективного процесса фильтрации на рукавах фильтра. Весьма важным является выбор конструкции газоходов «грязного» газа с минимальным сопротивлением. **ЦЕЛЬ** работы – оптимизировать конструкцию газоходов газоочистных установок сухого типа при помощи моделирования методом конечных элементов. **МЕТОДЫ.** При проектировании СГОУ конструкции АО «СибВАМИ» применялись различные расчетные методы. В качестве основного использовалось моделирование газодинамических процессов методом конечных элементов. В частности, моделирование газоходов грязного газа осуществлялось в программе ANSYS CFX. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Моделирование газоходов для отвода отходящих газов от выходов из-под корпусов электролиза (газоходы «грязного» газа) до установки газоочистки выполнялось для двух возможных схем газоходов, для которых были рассчитаны потери напора. **ВЫВОДЫ.** При проектировании СГОУ были приняты оптимальные конструктивные решения. В результате моделирования определена предпочтительная конструкция газоходов «грязного» газа, позволяющая минимизировать потерю напора.

Ключевые слова: газоочистная установка сухого типа, отходящие газы алюминиевого производства, моделирование газовых потоков, газоходы, CFD.

Информация о статье. Дата поступления 19 января 2018 г.; дата принятия к печати 15 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Книжник А.В., Григорьев В.Г., Ключанцев А.Б., Тепикин С.В., Пьянкин А.П., Кузьмин М.П., Кузаков А.А., Шемет А.Д., Высотский Д.В. Применение современных расчетных методов для оптимизации конструкции «сухой» газоочистной установки // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 209–219. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-209-219

APPLICATION OF MODERN CALCULATION METHODS TO OPTIMIZE A DRY-TYPE GAS CLEANING PLANT DESIGN

A.V. Knizhnik, V.G. Grigoriev, A.B. Klyuchantsev, S.V. Tepikin, A.P. Piyankin, M.P. Kuzmin, A.A. Kuzakov, A.D. Shemet, D.V. Vysotsky

Siberian Research Development and Design Institute of Aluminum and Electrode Industry JSC (SibVAMI JSC),
55, Sovetskaya St., Irkutsk, 664007, Russian Federation
Joint Company RUSAL Ltd. Engineering and Technology Center (RUSAL ETC Ltd),
37 Pogranichnikov St., 1bld, Krasnoyarsk, 660111, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
Autonomous subdivision of SibVAMI JSC in Krasnoyarsk,
2d, 9 May St., Krasnoyarsk, 660127, Russian Federation

ABSTRACT. SibVAMI JSC has developed a dry-type gas cleaning plant (DGCP) the technical concept of which is based on the modular design of a gas-cleaning installation. Being its components, the adsorber-reactor and bag filter provide a high purification level of electrolysis production exhaust gases and return the fluorine compounds adsorbed from these off-gases back to the process of electrolytic aluminum production. The fan provides gas movement through all sections of the DGCP gas path. Resistance minimization in these sections ensures a pressure drop sufficient for effective filtration on filter bags. It is very important to choose the design of “dirty” gas ducts with a minimum resistance. The **PURPOSE** of the paper is to optimize the design of flue gas ducts of dry-type gas-cleaning plants using a finite element modeling. **METHODS.** Different calculation methods have been used when developing the DGCP of SibVAMI JSC design. The main method was modeling of gas-dynamic processes by the finite element method. In particular, the modeling of dirty gas ducts has been carried out in the ANSYS CFX program. **RESULTS.** Modeling of gas ducts removing exhaust gases from the outlets from under the electrolysis pot rooms (“dirty” gas ducts) before the gas cleaning installation was performed for two possible schemes of gas ducts for which head losses were calculated. **CONCLUSIONS.** Optimal constructive decisions have been made when designing DGCP. The result of modeling is determination of a preferable design of “dirty” gas ducts enabling minimization of the head loss.

Keywords: dry-type gas cleaning plant (DGCP), exhaust gases of aluminum production, modeling of gas flows, gas ducts, CFD

Information about the article. Received January 19, 2018; accepted for publication February 15, 2018; available online March 31, 2018.



For citation. Knizhnik A.V., Grigoriev V.G., Klyuchantsev A.B., Tepikin S.V., Piyankin A.P., Kuzmin M.P., Kuzakov A.A., Shemet A.D., Vysotsky D.V. Application of modern calculation methods to optimize a dry-type gas cleaning plant design. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 209–219. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-209-219

Введение

Сегодня для промышленного получения алюминия используется единственный способ – электролитическое разложение глинозема (Al_2O_3) в расплаве криолита (Na_3AlF_6). Образующиеся в этом процессе катионы алюминия нейтрализуются на катоде на подине электролизера, а анионы кислорода окисляют углеграфитовый анод. Газы, образующиеся при окислении углерода, насыщаются испарениями фтористых соединений. Также к этим газам подмешиваются содержащиеся в аноде примеси и углеграфитовая пыль. Содержание вредных примесей в отходящих от электролизеров газах превышает предельно допустимые концентрации, поэтому газы необходимо очищать перед их выбросом. Использование современных методов очистки отходящих газов электролитического производства алюминия должно обеспечивать выполнение экологических требований. Одним из самых эффективных методов газоочистки является метод «сухой» очистки, основанный на адсорбции фтористых соединений окисью алюминия (глиноземом).

При «сухой» очистке в поток отходящих газов вводится глинозем. Благодаря малым размерам и небольшой скорости витания частицы глинозема распределяются по сечению газового тракта и вместе с газовым потоком поступают в реактор-адсорбер, далее – в поворотную камеру рукавного фильтра. При этом содержащиеся в газе фтористые соединения и органические вещества адсорбируются на развитой поверхности частиц глинозема. При

фильтрации газа частицы глинозема задерживаются на ткани рукавов фильтра, а очищенные газы проходят через фильтр и через дополнительную ступень мокрой очистки, после чего выбрасывается в атмосферу через дымовые трубы. Периодически рукава фильтра встряхиваются для очистки от накопленных частиц глинозема. Для встряхивания рукавов фильтра используются либо механические, либо пневмоимпульсные системы. В результате встряхивания глинозем, насыщенный фтористыми соединениями, осыпается с рукавов фильтра в бункерную часть рукавного фильтра и оттуда поступает в электролизеры в качестве сырья.

Таким образом, использование «сухой» очистки отходящих газов электролитического производства обеспечивает:

- соблюдение экологических требований к составу газовых выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду;
- возврат фтористых соединений из отходящих газов электролитического производства в технологический процесс получения алюминия-сырца.

Бесперебойное и эффективное ведение описанного выше процесса «сухой» газоочистки зависит от конструкции газоочистной установки. Конструкция сухой газоочистной установки (СГОУ), разработанной АО «СибВАМИ», оптимизирована на основе результатов математического моделирования, проведенного специалистами АО «СибВАМИ» и ООО «РУСАЛ ИТЦ».

Цели и объекты моделирования

В рамках технического перевооружения существующих газоочистных сооружений в электролитном производстве, состоящих из электрофильтров, СГОУ конструкции АО «СибВАМИ» планируется

устанавливать взамен устаревших газоочистных установок. Это позволит снизить уровень выбросов загрязняющих веществ в атмосферу, а также улучшить технические и технико-экономические показатели рабо-



ты электролизных цехов алюминиевого производства.

Высокая степень очистки газов, отходящих от электролизеров, на СГОУ конструкции АО «СибВАМИ» обусловлена применением современных технических решений [1–3]:

- реактор-адсорбер, основанный на принципе Вентури, обеспечивает равномерное распределение глинозема по объему отходящих газов;

- поворотная камера с распределительными перегородками обеспечивает равномерное распределение газового потока при входе в бункерную часть рукавного фильтра;

- в бункерной части рукавного фильтра установлены направляющие пластины, обеспечивающие равномерное распределение газового потока по рукавам и снижающие скорости газового потока в бункерной части.

В последнее десятилетие быстро развивающиеся методы вычислительной газодинамики стали применяться для моделирования рукавных фильтров. Большинство опубликованных работ посвящены конструкции распределительных перегородок и направляющих пластин, которые обеспечивают необходимое распределение газа по рукавам фильтра. Например, специалисты компании FLSmidth Airtech разместили в бункерной части фильтра около десятка направляющих пластин различного размера и ориентации. Конструктивные параметры этих пластин рассчитаны с помощью технологического пакета «Star-CCM+» для моделирования газовой динамики [4]. Пластины для распределения газового потока были использованы специалистами компании Danieli Corus для системы СГОУ алюминиевой промышленности [5, 6]. Таким образом, конструкция распределительных перегородок и направляющих пластин может оказывать значительное влияние на работу рукавного фильтра.

В последние годы появились работы, посвященные моделированию движения сжатого воздуха в процессе импульсной очистки рукавов. Специалисты компа-

нии FLSmidth Airtech использовали моделирование для оптимизации конструкции труб Вентури для равномерного распределения сжатого воздуха по объему рукава [7]. Работа [8] посвящена защите тканей рукавов от разрывов, вызванных действием сжатого воздуха. При этом моделировалось и экспериментально изучалось движение сжатого воздуха в раздающем патрубке и выход сжатого воздуха к рукавам через раздающие сопла.

Авторам настоящей работы неизвестны публикации, посвященные моделированию реактора-адсорбера. Наиболее близкой по тематике является работа [9], по результатам которой в 2015 г. в Новой Зеландии защищена докторская диссертация [10]. В этой работе сообщается о построении модели движения фильтруемых примесей в пространстве между рукавами рукавного фильтра. Специалисты АО «СибВАМИ» и ООО «РУСАЛ ИТЦ» впервые построили модель, где движение газов происходит в рукавном фильтре и реакторе-адсорбере.

При разработке объемно-планировочных и компоновочных решений СГОУ в конструкции АО «СибВАМИ» учитывалось расположение существующих объектов корпуса электролиза (дымососные, газоочистные сооружения, дымовые трубы, инженерные сети), поскольку их расположение влияло на конструктивное исполнение перечисленных выше технических решений. Для того чтобы разработать конструкцию СГОУ с учетом расположения существующих объектов, а также последних технических решений, применялось моделирование методом конечных элементов. Ранее в АО «СибВАМИ» моделирование методом конечных элементов использовалось при конструировании алюминиевого электролизера ОА–300. Результаты данного моделирования были опубликованы в работах [11–13].

При проектировании СГОУ конструкции АО «СибВАМИ» проводилось моделирование следующих объектов:

- газоходов «грязного» газа, т.е. газоходов, транспортирующих насыщенные



фтористыми соединениями газы от выходов из-под корпусов электролиза до входа в реактор газоочистной установки. Задача заключалась в выборе оптимальной конфигурации газопроводов и оценке потери давления в различных ветвях газопроводов;

– реакторов-адсорберов и поворотной камеры рукавного фильтра. Целью моделирования являлся подбор конструкции реактора и конструкции распределительных устройств в поворотной камере для обеспечения равномерного распределения газа по сечениям газового тракта;

– рукавного фильтра. Цели моделирования – проверить прочность и устойчивость металлоконструкций корпуса фильтра, оценить необходимость тепловой изоляции на корпусе фильтра, оптимизировать конструкцию распределительных устройств на входе в камеру фильтрации;

– газопроводов «чистого» газа, т.е. газа, прошедшего через ткань от вентиляторов до устья дымовой трубы. Задача – оптимизировать конструкцию, оценить потерю напора давления.

Для проведения расчетов и моделирования использовались следующие программные средства и методики [14–17]:

– ANSYS CFX 17.1 (моделирование газодинамики);

– SCAD Office (расчет рукавного фильтра на прочность и устойчивость);

– СП 61.13330.2012 (расчет тепловой изоляции).

В настоящей работе представлена оптимизация конструкции газопроводов «грязного» газа с помощью моделирования методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS CFX 17.1.

Моделирование газопроводов от корпусов электролиза до реакторов СГОУ

Газопроводы предназначены для транспортировки «грязного» газа от выходов из-под корпусов электролиза до входа в реакторы СГОУ. В проектировании этих газопроводов учитывалось расположение существующих дымовых и дымососных труб, вследствие чего газопроводы «грязного» газа были выполнены с ветвями различной длины.

Среди возможных вариантов прокладки трассы газопроводов были выбраны два варианта конструкции:

В конструкции *варианта I* сначала объединяются газы от двух выходов газопроводов из-под одного корпуса электролиза, перед входом в СГОУ объединяются газы от двух корпусов электролиза (рис. 1).

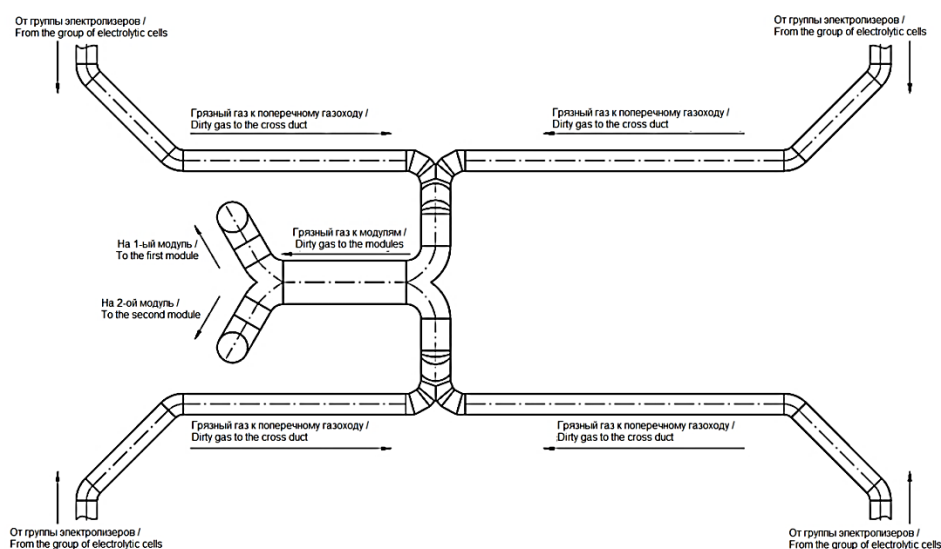


Рис. 1. Схема газопроводов конструкции варианта I
Fig. 1 Scheme of ducts of the variant I design



В конструкции *варианта II* сначала объединяются газоходы по торцам – отдельно по северным торцам двух корпусов электролиза и отдельно по южным торцам двух корпусов электролиза. Перед входом на СГОУ объединяются газоходы северных и южных торцов корпусов серии электролиза (рис. 2).

Моделирование газоходов проводилось с целью выбора оптимального варианта его конструкции. Необходимо отметить, что диаметры ветвей газоходов были предварительно определены с помощью классических аэродинамических расчетов по известным формулам.

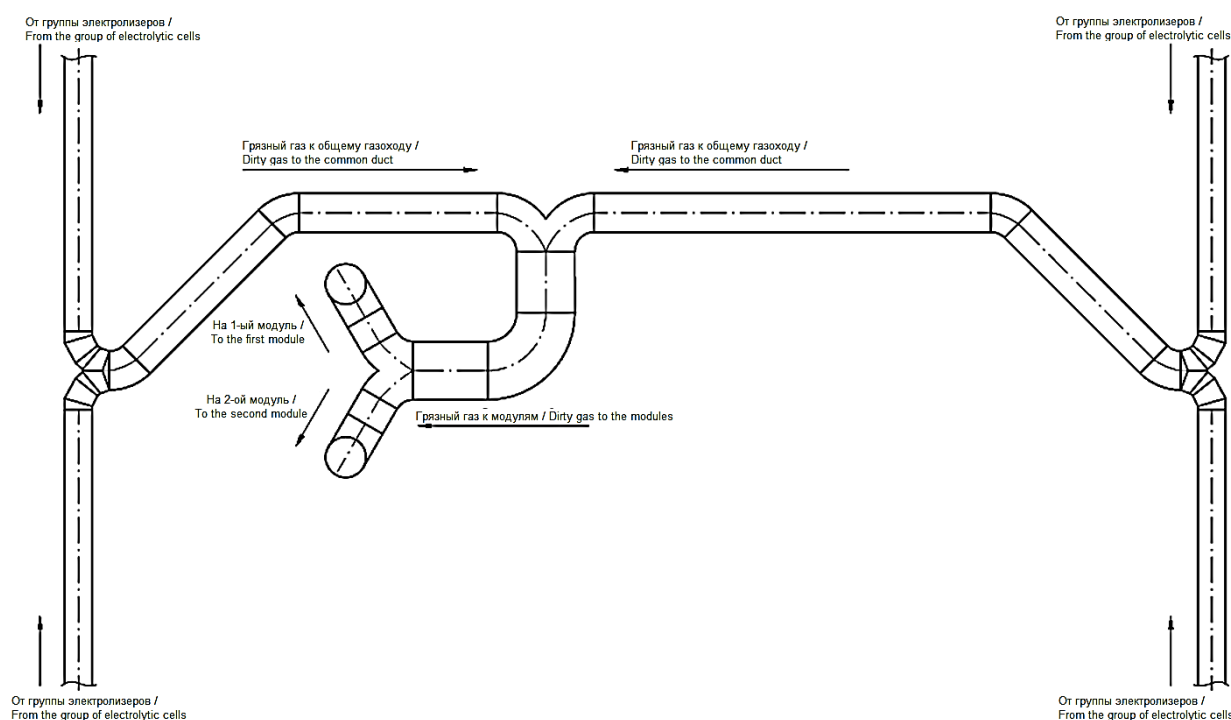


Рис. 2. Схема газоходов конструкции варианта II
Fig. 2. Scheme of ducts of the variant II design

Конструкция газоходов варианта I

В конструкции варианта I два входных участка (без учета отводов) имеют длину 65,1 м, а два других входных участка – 56,7 м; внутренний диаметр входных участков – 0,9 м; ожидаемая скорость газового потока – 14,2 м/с. Два соединяющих участка имеют длину по 13,6 м каждый с внутренним диаметром 1,2 м. Ожидаемая скорость газового потока составляет 16,0 м/с. Общий газоход имеет длину 30,9 м и внутренний диаметр 1,8 м, скорость газа – 14,2 м/с. (см. рис. 1).

Результаты моделирования полного давления газа в газоходах варианта I пока-

заны на рис. 3. Расчет был выполнен на основе предположения о равном давлении на входах в газоход. Были заданы следующие граничные условия, обозначенные литерой А:

- средняя скорость на выходе из газохода – 14,2 м/с;
- полное давление на входах в газоходы – 0 Па.

В расчетах была использована обычная модель турбулентности $k-\epsilon$. Шероховатость стенки газохода не учитывалась. Свойства газа принимались равными свойствам воздуха при температуре 130°C.

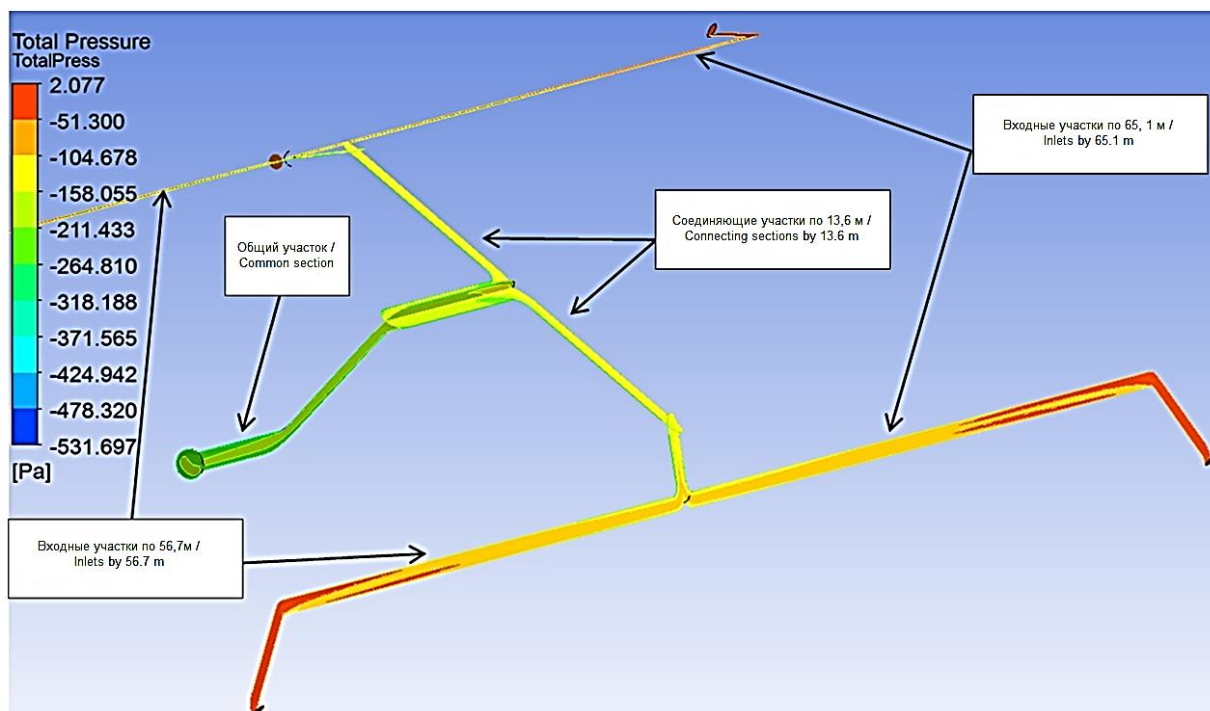


Рис. 3. Полное давление газа в газоходах: вариант I, граничные условия A
Fig. 3. Total gas pressure in gas ducts: variant I, boundary conditions A

Одним из важнейших свойств газа является вязкость. Для учета влияния температуры на вязкость значение динамической вязкости было задано в явном виде, т.е. было использовано значение вязкости $2,35 \times 10^{-5}$ Па·с, а не зависимость вязкости от температуры в явном виде.

Результаты расчетов полного дав-

ления газа для варианта I представлены в таблице (также см. рис. 3), из которой видно, что его расход по длинным и коротким ветвям составляет 34056 и 33995 м³/ч соответственно. Эти значения отличаются от среднего расхода газа – 34116 м³/ч – менее чем на 0,5%, поэтому можно считать, что они практически совпадают.

Результаты расчетов полного давления газа в газоходах
Calculation results of the total gas pressure in gas ducts

Параметр / Parameter	Значение для различных вариантов конструкции и типов граничных условий / Values for different designs and types of boundary conditions		
	Вариант I, условия A / Variant I of A condition	Вариант II / Variant II	
		условия A / of A condition	условия B / of B condition
Потеря напора в газоходе, Па / Head loss in a gas duct, Pa	230	200	300
Потеря напора по длинной ветви, Па / Head loss in a long branch, Pa	–	–	300
Потеря напора по короткой ветви, Па / Head loss in a short branch, Pa	–	–	200
Средний расчетный расход на ветвь, м ³ /ч / Average estimated flow per branch, m ³ /h	34 056	34 056	32 500
Расчетный расход на длинную ветвь, м ³ /ч / Estimated consumption per a long branch, m ³ /h	33 995	29 385	–
Расчетный расход на короткую ветвь, м ³ /ч / Estimated consumption per a short branch, m ³ /h	34 116	38 746	–



Конструкция газоходов варианта II

Для конструкции варианта II четыре входных участка (без учета отводов) имеют одинаковую длину – 20,1 м. Соединяющие участки имеют длины 29,9 и 76,3 м. Общий газоход имеет длину 12,7 м (см. рис. 2).

Результаты моделирования полного давления в газоходах варианта II показаны на рис. 4. Расчет был выполнен на основе предположения о равенстве давлений на входах в газоход. На выходе из газохода была задана средняя скорость 14,2 м/с. На входах в газоходы задано полное давление, равное 0 Па. Такие граничные условия выше обозначены литерой А. Результаты представлены в таблице.

Как следует из таблицы, расходы по

длинным и коротким ветвям отличаются от среднего значения на 15% в большую и меньшую стороны.

Потеря напора для обеих ветвей составляет около 200 Па. Одинаковая потеря напора в ветвях разной длины обусловлена различным количеством газа. При одинаковом количестве газа, поступающего из различных ветвей, аэродинамическое сопротивление длинной ветви газохода увеличится. Для количественной оценки сопротивления длинной ветви газохода было выполнено моделирование конструкции варианта II с измененными граничными условиями:

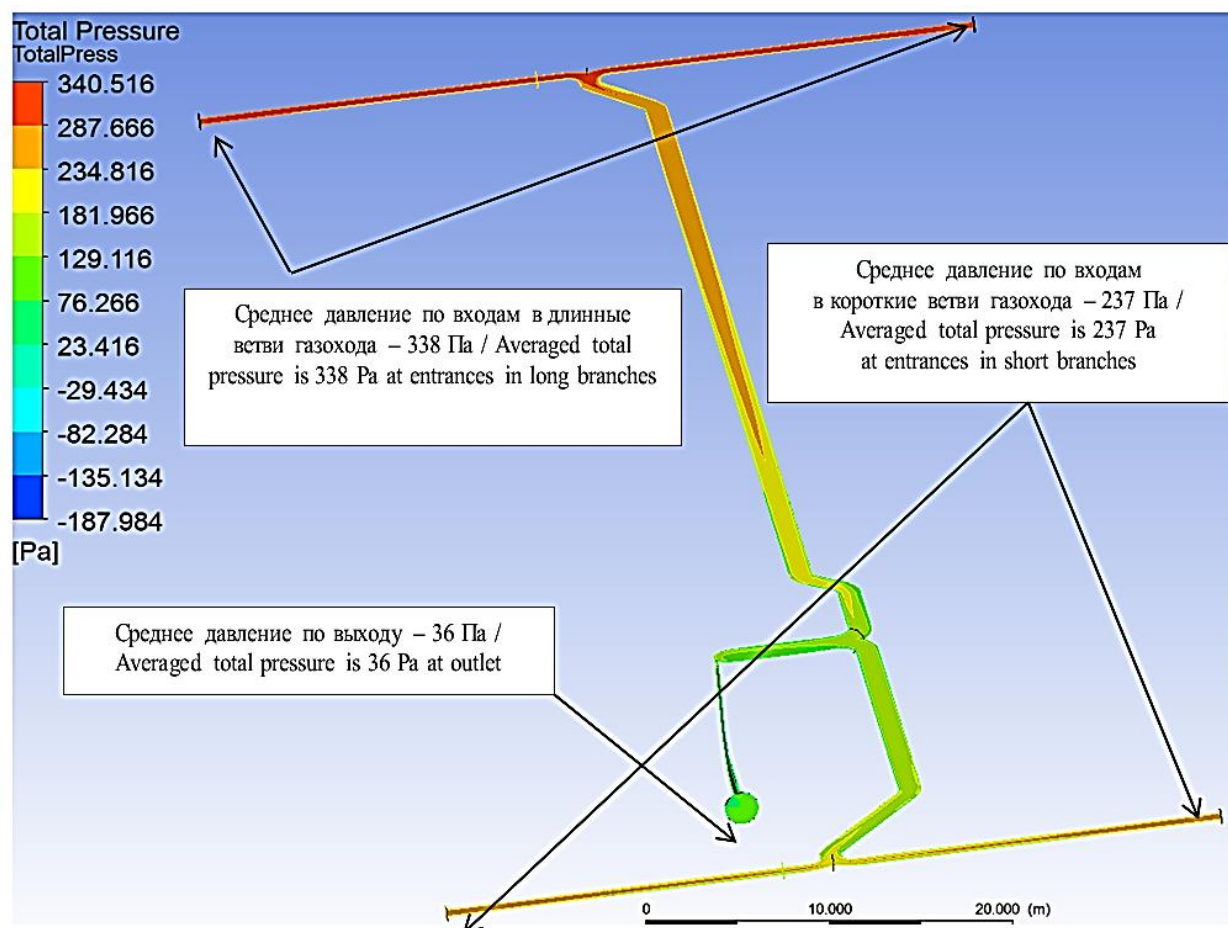


Рис. 4. Полное давление газа в газоходах: вариант II, граничные условия Б (одинаковый расход газа по ветвям)

Fig. 4. Total gas pressure in gas ducts: variant II, boundary conditions B (equal gas consumption by branches)



– на выходе из газохода среднее статическое давление равно 0 Па;

– на входах в газоходы расход газа задан в объеме $130000 \text{ м}^3/\text{ч} / 4 = 32500 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Как следует из таблицы, при равном расходе газа по ветвям сопротивление газохода равно 300 Па. Разность сопротивлений длинной и короткой ветви составляет 100 Па. В целях обеспечения равного расхода газа по ветвям в короткую ветвь газохода конструкции варианта II необходимо вставить шибер для создания дополнительного сопротивления.

Согласно расчету, при отсутствии регулирующего устройства в короткой ветви газохода конструкции варианта II расход газа по ветвям будет значительно отличаться – 29,4 и 38,7 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$. Фактически на распределение газа по ветвям газохода влияют подводящие газоходы внутри корпусов. С учетом газоходов, расположенных внутри корпусов, расход газа по ветвям газохода выравнивается. Однако их разность превышает разность расхода для конструкции варианта I. Следовательно, в качестве предпочтительной и оптимальной схемы трассировки газохода предложена конструкция газохода по варианту I.

Заключение

На основе выполненного моделирования можно утверждать, что конструкция газоходов по варианту I обеспечивает меньшую потерю напора по сравнению с конструкцией по варианту II. Проведенные исследования могут являться основой для проектирования газоочистных установок «сухого» типа, обеспечивающих соблюде-

ние экологических требований к составу газовых выбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, а также возврат фтористых соединений из отходящих газов электролизного производства в технологический процесс получения алюминия-сырца.

Библиографический список

1. Григорьев В.Г., Тепикин С.В., Пьянкин А.П., Высотский Д.В., Ермаков А.В., Жердев А.С., Казанцев М.Е., Павлов С.Ю. Техническое перевооружение установки «сухой» газоочистки для электролизеров с обожженными анодами ОАО «РУСАЛ Новокузнецк» // Цветные металлы и минералы – 2015: сб. докл. VII Междунар. конгресса (Красноярск, 14–17 сентября 2015 г.). Красноярск, 2015. С. 415–416.
2. Григорьев В.Г., Тепикин С.В., Кузаков А.А., Высотский Д.В., Шемет А.Д., Богданов Ю.В. Газоочистная установка ОК «РУСАЛ». Технологические и компоновочные решения // Цветные металлы и минералы – 2016: сб. тезисов докл. VIII Междунар. конгресса (Красноярск, 13–16 сентября, 2016 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2017. С. 84–85.
3. Григорьев В.Г., Тепикин С.В., Кузаков А.А., Пьянкин А.П., Высотский Д.В., Книжник А.В. Реактор и рукавный фильтр сухой газоочистной установки ОК «РУСАЛ» // Цветные металлы и минералы – 2016: сб. тезисов докл. VIII Междунар. конгресса (Красноярск, 13–16 сентября 2016 г.). Красноярск: Научно-инновационный центр, 2017. С. 96–97.
4. Nielsen N.F., Skriver K.G., Castaco L.J. Fabric Filter Optimization using Computational Fluid Dynamics // The International Conference on Electrostatic Precipitation ICESP XII. Australia, Australian Capital Territory, Canberra, 2011. P. 239–243.
5. Дюпон Э., Клут П., Энгель Э. Опыт в проектировании, эксплуатации и развитии газоочистительного центра (ГОЦ) // Цветные металлы – 2012: сб. науч. ст. Красноярск: Версо, 2012. С. 402–407.
6. Klut P., Turco T., Ewalts W., Dupon E. Compact GTC Design: Reducing Footprint and Overall Steel Weight // Light Metals. 2016. P. 453–456. <https://doi.org/0.1002/9781119274780.ch74>
7. Andersen B.O., Nielsen N.F., Walther J.H. Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters // Powder Technology. 2016. Vol. 291. P. 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.028>
8. Rui Zhou, Henggen Shen, Meili Zhao. Simulation Studies on Protector of Pulse-jet Cleaning Filter Bag // Energy Procedia. 2012. Vol. 16. P. 426–431. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.069>
9. Litchwark J.O., Winchester J., Nijdam J.J. Effects of Humidity and Temperature on the Performance of Milk Powder Baghouses // Journal of Medical and Bioengineering. 2015. Vol. 2. No. 3. P. 157–162. <https://doi.org/10.12720/jomb.2.3.157-162>
10. Litchwark J.O. Baghouse design for milk powder collection. PhD Thesis. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2014.



11. Богданов Ю.В., Григорьев В.Г., Книжник А.В., Кондратьев В.В., Чалых В.И. Моделирование энергетических и магнитогидродинамических характеристик электролизера с обожженными анодами на силу тока 300 кА при ее повышении до 330 кА // Цветные металлы. 2009. № 2. С. 42–46.
12. Книжник А.В., Богданов Ю.В., Зельберг Б.И. К вопросу о построении численной модели температурного поля алюминиевого электролизера // Алюминий Сибири – 2007: сб. докл. XIII Междунар. конф. (Красноярск, 11–13 сентября 2007 г.). Красноярск: Версо, 2007. С. 72–74.
13. Knizhnik A.V., Kuzakov A.A., Zelberg B.I., Veselkov V.V. Application of mathematical methods to optimize aluminium production in pre-baked anode cells // Light Metals. 2008. P. 437–442.
14. Кузьмин П.Б., Кузьмина М.Ю. О производстве чушек первичных силуминов, модифицированных стронцием // Литейное производство. 2014. № 8. С. 2–5.

15. Пьявкина А.А., Кузьмина М.Ю. Возможность модифицирования силуминов стронцием // Перспективы развития технологии переработки углеводородных, растительных и минеральных ресурсов: материалы науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 24–25 апреля 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. С. 21–22.
16. Ёлкин К.С., Карлина А.И., Иванчик Н.Н., Шахрай С.Г. Электрическая очистка газов производства кремния // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. (Иркутск, 30 сентября – 03 октября 2015 г.); в 2 т. Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2015. Т. 1. С. 226–232.
17. Кондратьев В.В., Иванов Н.А., Карлина А.И., Коргапольцев С.К. Автоматизированная система управления параметрами систем газоочистки технологических процессов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 2 (54). С. 90–94.

References

1. Grigor'ev V.G., Tepikin S.V., P'yankin A.P., Vysotskii D.V., Ermakov A.V., Zherdev A.S., Kazantsev M.E., Pavlov S.Yu. *Tekhnicheskoe perevooruzhenie ustanovki «sukhoi» gazoochistki dlya elektrolizerov s obozhzhennymi anodami OAO «RUSAL Novokuznetsk»* [Technical re-equipping of the “dry” gas cleaning unit for electrolyzers with burned anodes of JSC “RUSAL Novokuznetsk”]. *Sbornik dokladov VII Mezhdunarodnogo kongressa “Tsvetnye metally i mineraly – 2015”* [Collection of articles of VII International Congress “Non-ferrous metals and minerals – 2015”]. Krasnoyarsk, 2015, pp. 415–416. (In Russian).
2. Grigor'ev V.G., Tepikin S.V., Kuzakov A.A., Vysotskii D.V., Shemet A.D., Bogdanov Yu.V. *Gazoochistnaya ustanovka OK «RUSAL». Tekhnologicheskie i komponovochnye resheniya* [Gas cleaning unit of JC “RUSAL”. Technological and layout solutions]. *Sbornik tezisov dokladov VIII Mezhdunarodnogo kongressa “Tsvetnye metally i mineraly – 2016”* [Collection of article abstracts of VIII International Congress “Non-ferrous metals and minerals – 2016”]. Krasnoyarsk: Scientific and Innovation Centre Publ., 2017, pp. 84–85. (In Russian).
3. Grigor'ev V.G., Tepikin S.V., Kuzakov A.A., P'yankin A.P., Vysotskii D.V., Knizhnik A.V. *Reaktor i rukavnyi fil'tr sukhoi gazoochistnoi ustanovki OK «RUSAL»* [Reactor and bag filter of dry gas cleaning unit of JC “RUSAL”]. *Sbornik tezisov dokladov VIII Mezhdunarodnogo kongressa “Tsvetnye metally i mineraly – 2016”* [Collection of article abstracts of VIII International Congress “Non-ferrous metals and minerals – 2016”]. Krasnoyarsk: Scientific and Innovation Centre Publ., 2017. С. 96–97. (In Russian).
4. Nielsen N.F., Skriver K.G., Castaco L.J. Fabric Filter Optimization using Computational Fluid Dynamics. The International Conference on Electrostatic Precipitation ICESP XII. Australia, Australian Capital Territory, Can-

- berra, 2011, pp. 239–243.
5. Dyupon E., Klut P., Engel' E. *Opyt v proektirovanii, ekspluatatsii, razvitii gazoochistitel'nogo tsentra (GOTs)* [Experience in designing, operation and development of a gas cleaning center]. In: “Tsvetnye metally – 2012” [Non-ferrous metals – 2012]. Krasnoyarsk: Verso Publ., 2012, pp. 402–407. (In Russian).
6. Klut P., Turco T., Ewalts W., Dupon E. Compact GTC Design: Reducing Footprint and Overall Steel Weight. *Light Metals*. 2016, pp. 453–456. <https://doi.org/10.1002/9781119274780.ch74>
7. Andersen B.O., Nielsen N.F., Walther J.H. Numerical and experimental study of pulse-jet cleaning in fabric filters. *Powder Technology*. 2016, vol 291, pp. 284–298. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.12.028>
8. Rui Zhou, Henggen Shen, Meili Zhao. Simulation Studies on Protector of Pulse-jet Cleaning Filter Bag. *Energy Procedia*. 2012, vol. 16, pp. 426–431. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.069>
9. Litchwark J.O., Winchester J., Nijdam J.J. Effects of Humidity and Temperature on the Performance of Milk Powder Baghouses. *Journal of Medical and Bioengineering*. 2015, vol. 2, no. 3, pp. 157–162. <https://doi.org/10.12720/jomb.2.3.157-162>
10. Litchwark J.O. Baghouse design for milk powder collection. PhD Thesis. University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2014.
11. Bogdanov Yu.V., Grigor'ev V.G., Knizhnik A.V., Kondrat'ev V.V., Chalykh V.I. Simulation of power and magnetic hydrodynamic parameters of electrolysis with roasted anodes for 300kA current up to 330 kA current. *Tsvetnye metally* [Non-ferrous metals.]. 2009, no. 2, pp. 42–46. (In Russian).
12. Knizhnik A.V., Bogdanov Yu.V., Zel'berg B.I. *K voprosu o postroenii chislennoi modeli temperaturnogo polya alyuminievogo elektrolizera* [On the problem of constructing a numerical model of the temperature field



of an aluminum electrolyzer]. *Sbornik dokladov XIII Mezhdunarodnoi konferentsii "Aluminii Sibiri – 2007"* [Collection of articles of XIII International Conference "Siberian Aluminum – 2007"]. Krasnoyarsk: Verso Publ., 2007, pp. 72–74. (In Russian).

13. Knizhnik A.V., Kuzakov A.A., Zelberg B.I., Veselkov V.V. Application of mathematical methods to optimize aluminium production in pre-baked anode cells. *Light Metals*, 2008, pp. 437–442.

14. Kuz'min P.B., Kuz'mina M.Yu. About production of primary siluminsingots medified with strontium. *Liteinoe proizvodstvo* [Foundry]. 2014, no. 8, pp. 2–5. (In Russian).

15. P'yavkina A.A., Kuz'mina M.Yu. *Vozmozhnost' modifitsirovaniya siluminov strontsiem* [Possibility to modify silumin with strontium]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnykh, rastitel'nykh i mineral'nykh resursov"* [Proceedings of scientific and practical conference with international partic-

ipation "Development prospects of the processing technology of hydrocarbon, plant and mineral resources"]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2014, pp. 21–22. (In Russian).

16. Elkin K.S., Karlina A.I., Ivanchik N.N., Shakhrai S.G. *Elektricheskaya ochistka gazov proizvodstva kremniya* [Electrical cleaning of gases for silicon production]. *Materialy VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona"* [Proceedings of VI International scientific and practical conference "Transport infrastructure of the Siberian region"]. Irkutsk: Irkutsk State Transport University Publ., 2015, vol. 1, pp. 226–232. (In Russian).

17. Kondrat'ev V.V., Ivanov N.A., Karlina A.I., Korgapol'tsev S.K. Technological processes gas cleaning systems of parameters experimental research. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2017, no. 2 (54), pp. 90–94. (In Russian).

Критерии авторства

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

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



ИССЛЕДОВАНИЕ ТВЕРДОФАЗНЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ СПЕКАНИИ ИЗВЕСТНЯКОВО-НЕФЕЛИНОВОЙ ШИХТЫ С ТЕХНОГЕННЫМИ ДОБАВКАМИ

© И.И. Шепелев¹, А.М. Жижаяев², А.Ю. Сахачев³, Н.К. Алгебраистова⁴

¹Научно-исследовательская организация ООО «ЭКО-Инжиниринг»,

662150, Российская Федерация, г. Ачинск, Южная Промзона, квартал XII, стр. 1.

²Институт химии и химической технологии СО РАН,

660036, Российская Федерация, г. Красноярск, Академгородок, 50, стр. 24.

³Акционерное общество «РУСАЛ Ачинск»,

662150, Российская Федерация, г. Ачинск, Южная Промзона, квартал XII, стр. 1.

⁴Сибирский федеральный университет,

660025, Российская Федерация, г. Красноярск, пр-кт Красноярский рабочий, 95.

РЕЗЮМЕ ЦЕЛЬ. Изучение термохимических превращений в известняково-нефелиновой шихте с вводом добавок техногенного происхождения в процессе спекания. **МЕТОДЫ.** Использованы термоаналитические, электронно-микроскопические и минералогические методы исследования и рентгенофазовый анализ. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Для повышения содержания глинозема в известняково-нефелиновой шихте при переработке некондиционной нефелиновой руды по способу спекания предлагается вводить в нее шлак ферротитанового производства. Показано, что ферротитановый шлак неоднороден по фазовому и химическому составу, поскольку имеет техногенное происхождение и представлен большим количеством тонко проросших минеральных фаз. Основные алюмосодержащие минералы ферротитанового шлака – это анальцит, монтмориллонит, герцинит и железозамещенный гроссуляр. Отмечено, что поведение минералов при спекании известняково-нефелиновой шихты при вводе в шихту добавок ферротитанового шлака существенно различается. Доказано, что в процессе содового выщелачивания минералы шлака – анальцит и монтмориллонит, вскрываются достаточно легко. Вскрытие гроссуляра возможно только в сильнощелочных условиях содовой плавки. Полного вскрытия шпинельного герцинита (FeAl_2O_4) не удастся добиться даже в жестких условиях. Технологические исследования по спеканию известняково-нефелиновой шихты с добавлением измельченного до 100% класса -0,074 мм ферротитанового шлака показали увеличение содержания оксида алюминия в спеке. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Проведенные термографические исследования ферротитанового шлака и его смеси с содой и известняком при нагревании показали, что температура спекообразования шихты со шлаком находится на уровне 1237°C, что ниже температуры спекообразования известняково-нефелиновой шихты без добавления шлака. Результаты технологических испытаний по спеканию шихты с вводом ферротитанового шлака подтвердили результаты термоаналитических исследований. Ввод 5% измельченного до 100% класса -0,074 мм шлака ферротитанового производства в шихту увеличил содержание оксида алюминия в спеке с 16 до 17,5–18,5%.

Ключевые слова: производство глинозема, шлак ферротитанового производства, нефелиновая руда, термохимические превращения, известняково-нефелиновая шихта, технологические исследования.

Информация о статье. Дата поступления 29 января 2018 г.; дата принятия к печати 12 февраля 2018 г.; дата онлайн-размещения 21 марта 2018 г.

¹Шепелев Игорь Иннокентьевич, доктор технических наук, директор, e-mail: Ekoing@mail.ru

Igor I. Shepelev, Doctor of technical sciences, директор, e-mail: Ekoing@mail.ru

²Жижаяев Анатолий Михайлович, кандидат технических наук, заведующий лабораторией рентгеновских и спектральных методов анализа, e-mail: zhyzhaev@icct.ru

Anatoly M. Zhyzhaev, Candidate of technical sciences, Head of the Laboratory of X-ray and Spectral Analysis Methods, e-mail: zhyzhaev@icct.ru

³Сахачев Алексей Юрьевич, директор по обеспечению производства, e-mail: Sakhachev_Aleks@mail.ru

Aleksei Yu. Sakhachev, Director for Production Support, e-mail: Sakhachev_Aleks@mail.ru

⁴Алгебраистова Наталья Константиновна, кандидат технических наук, доцент кафедры обогащения полезных ископаемых, e-mail: algebraistova@mail.ru

Natalia K. Algebraistova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Minerals Concentration, e-mail: algebraistova@mail.ru



Формат цитирования. Шепелев И.И., Жижаев А.М., Сахачев А.Ю., Алгебраистова Н.К. Исследование твердофазных процессов при спекании известняково-нефелиновой шихты с техногенными добавками // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 220–233. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-220-233

STUDY OF SOLID PHASE PROCESSES UNDER SINTERING OF LIMESTONE-NEPHELINE MIXTURE WITH TECHNOGENOUS ADDITIVES

I.I. Shepelev, A.M. Zhyzhaev, A.Yu. Sakhachev, N.K. Algebraistova

Research Institution ECO-Engineering LLC,
1 bld, XII Kvartal, Yuzhnaya Promzona, Achinsk, 662150, Russian Federation
Institute of Chemistry and Chemical technology SB RAS,
24 bld, Akademgorodok 50, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation
RUSAL Achinsk JSC,
1 bld, XII Kvartal, Yuzhnaya Promzona, Achinsk, 662150, Russian Federation
Siberian Federal University,
95, Krasnoyarskiy rabochiy pr., Krasnoyarsk, 660025, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to study the thermochemical transformations occurring in limestone-nepheline mixture under sintering when technogenous additives are introduced. **METHODS.** Thermogravimetry, electron microscopy, mineralogical and x-ray diffractometric methods have been used in the study. **RESULTS.** It is proposed to introduce ferrotitanium slag in order to increase the content of alumina in limestone-nepheline mixture when sintering off-spec nepheline ore. It is shown that phase and chemical composition of ferrotitanium slag is not uniform since the slag is of technogenous genesis and contains many fine intergrowing mineral phases. The main minerals of the alumina containing slag are analcime ($\text{Na}(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$), montmorillonite ($\text{Al}(\text{OH})_2)_{0.33}\text{Al}_2(\text{Si}_{3.67}\text{Al}_{0.33}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$), hercynite (FeAl_2O_4) and iron replaced grossular ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$). It is noted that the behavior of minerals under limestone-nepheline mixture sintering differs significantly when ferrotitanium slag is introduced. It has been proved that slag minerals – analcime and montmorillonite – can be easily released in the process of caustic leaching. Grossular can be released in strong caustic condition only. Spinel hercynite (FeAl_2O_4) can not be broken down completely even in strong caustic conditions. Technological studies of limestone-nepheline mixture sintering with the addition of grounded ferrotitanium slag (100% - 0.074 mm fraction) have shown the increase of alumina content in the sinter. **CONCLUSION.** Conducted thermochemical studies of ferrotitanium slag and its soda and limestone mixture calcination have shown that sintering temperature is about 1237°C. It is lower than the sintering temperature of limestone-nepheline mixture without slag additions. The results of technological tests of mixture sintering in the presence of ferrotitanium slag have confirmed the results of thermooanalytical studies. Addition of 5% of grounded ferrotitanium slag (100% - 0.074 mm fraction) in limestone-nepheline mixture has increased the alumina content in sinter from 16 to 17.5–18.5%.

Keywords: alumina production, ferrotitanium slag, nepheline ore, thermochemical transformations, limestone-nepheline mixture, technological studies

Information about the article. Received January 29, 2018; accepted for publication February 12, 2018; available online 21 March 2018.

For citation. Shepelev I.I., Zhyzhaev A.M., Sakhachev A.Yu., Algebraistova N.K. Study of solid phase processes under sintering of limestone-nepheline mixture with technogenous additives. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 220–233. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-220-233

Введение

Алюминиевая промышленность является одной из ведущих отраслей российской цветной металлургии. По производству электролитического алюминия Россия превосходит такие развитые страны, как Германия, Франция, Канада [1–3]. Производство глинозема во всем мире осуществляется преимущественно из высококачественных бокситов гиббситового или

гиббсит-бемитового типа, которые перерабатываются по способу Байера [4–5]. Известно, что основные мощности по производству алюминия компании «РУСАЛ» сосредоточены в Сибири. Однако для этих алюминиевых заводов существует дефицит глинозема, и его доставка осуществляется в основном из-за рубежа. Ввиду удаленности алюминиевых заводов от границ РФ



возрастают транспортные проблемы, которые тесно связаны с экономической составляющей стоимости поставляемого из-за рубежа глинозема. В России для получения глинозема в промышленном масштабе на АО «РУСАЛ Ачинск» реализована комплексная переработка нефелинов по способу спекания [6]. Отличительной особенностью данной технологии по сравнению с чисто гидрохимическим байеровским процессом является операция содового спекания – пирометаллургический передел. Но в настоящее время в связи с истощением ресурсов кондиционных нефелиновых руд перед Ачинским глиноземным комбинатом стоит задача формирования новой сырьевой базы, решение которой можно осуществить нетрадиционным путем с привлечением других типов сырья и созданием на их основе рудных композиций, состоящих из известных и широко распространенных в Сибири разных типов сырья, в том числе техногенного происхождения [7–12]. В связи с ухудшением качества нефелиновой руды на Кия-Шалтырском нефелиновом руднике становится актуальной проблема ввода в известняково-нефелиновую шихту алюминий повышающих добавок [13, 14].

Учитывая, что по содержанию оксида алюминия шлаки ферротитанового производства (Fe-Ti шлак) сопоставимы с бокситами, их вполне можно рассматривать в качестве добавки к сырьевой шихте АО «РУСАЛ Ачинск» [15, 16]. Проведенные лабораторные исследования и опытно-промышленные испытания по вводу в сырьевую шихту этих техногенных добавок показали, что для использования в технологии получения глинозема их необходимо подвергать тонкому измельчению [16]. Учитывая, что шлаки ОАО «Ключевский завод ферросплавов» имеют непостоянный состав в связи с использованием нового вида сырья, переходом с ильменита Кусинского месторождения на лейкоксеновый концентрат Иршанского ГОКа [17], целесообразно изучить поведение минералов шлака в процессе шихтоподготовки и термохимические превращения, происходящие в известняково-нефелиновой шихте при температуре спекания после добавления шлака.

Целью настоящего исследования являлось изучение термохимических превращений в известняково-нефелиновой шихте с вводом добавок техногенного происхождения в процессе спекания.

Материалы и методы исследования

В качестве объектов исследования были взяты пробы нефелиновой руды Кия-Шалтырского нефелинового рудника, известняка Мазульского известнякового рудника и ферротитанового шлака ОАО «Ключевской завод ферросплавов» [16]. Глиноземистый шлак ферротитанового производства характеризуется широким спектром химико-минералогического состава, микроструктуры и физико-химических свойств. Минеральный состав глиноземистых шлаков ферротитанового производства в основном может быть описан диаграммой состояния Al_2O_3 – TiO_2 – CaO , в которой имеются бинарные соединения, представленные алюминатами и титанатами кальция [18]. Определение массовых долей натрия, магния, алюминия, кремния, кальция, титана, железа производилось в

пересчете на оксиды рентгеноспектральным методом.

Термоаналитические исследования проводили на дериватографе Q-1500 (Paulik-Paulik-Erday, Венгрия) в интервале 20–1300°C с навеской материала 1 г в керамических тиглях, а также на синхронном термоанализаторе SDT Q600 (TA Instruments) в температурном интервале 20–1300°C с навеской материала 10–20 мг в платиновом тигле. Спек после анализа извлекался из керамического тигля дериватографа, измельчался до крупности –100 мкм на лабораторной вибрационной мельнице КМ-1 и подвергался, так же, как и исходные материалы, рентгенофазовому анализу на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3М (напряжение – 36 кВ; ток – 14 мА; излучение – CuK_{α} ; шаг сканирования – 0,02



град., время накопления в точке – 1 с). Исходные образцы и полученные спеки подвергались электронно-микроскопическим исследованиям для контроля минеральных преобразований при спекании. Электронно-микроскопические исследования проводили на низковакуумном сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) TM3000 (Hitachi, Япония) с встроенным энерго-

дисперсионным спектрометром и системой рентгеновского микроанализа Quantax70 (Bruker) в обратно отраженных электронах. Измельченные образцы фиксировались эпоксидной смолой, поверхность полученной шашки шлифовалась наждачной бумагой P200-P1000 и полировалась корундовыми суспензиями 3М.

Результаты исследования и их обсуждение

Ферротитановый шлак крайне неоднороден по фазовому и химическому составу, поскольку имеет техногенное происхождение и представлен большим количеством тонко проросших минеральных фаз. По данным электронной микроскопии наиболее интересные для переработки алюмосодержащие фазы представлены двумя видами минералов: натрий-алюмосиликатами с примесью калия и кальций-алюмосиликатами с примесью железа (рис. 1).

Карты распределения элементов по области, определяемой рис. 1, приведены на рис. 2.

В соответствии с данными рентгенофазового анализа (рис. 3) натрийсодер-

жащая композиция представлена в основном анальцимом ($\text{Na}(\text{Si}_2\text{Al})\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$; $d = 5,58$; $3,5$; $2,49 \text{ \AA}$; JCPDS; 41-1478) в тонком взаимопрорастании с монтмориллонитом ($(\text{Al}(\text{OH})_2)_{0.33}\text{Al}_2(\text{Si}_{3.67}\text{Al}_{0.33}\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; $d = 11,11$; $4,45$; $3,16 \text{ \AA}$; JCPDS; 11-303). Кальцийсодержащая композиция представлена в основном гроссуляром ($\text{Ca}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_2(\text{OH})_4$; $d = 3,04$; $2,64$; $2,4 \text{ \AA}$; JCPDS; 39-368). Кроме того, присутствует существенное количество алюмосодержащего герцинита (FeAl_2O_4 ; $d = 2,025$; $1,562$; $1,432 \text{ \AA}$; JCPDS; 7-68), а также свободный и в агрегатах с другими фазами портландит ($\text{Ca}(\text{OH})_2$; $d = 3,09$; $2,6$; $1,91 \text{ \AA}$; JCPDS; 44-1481).

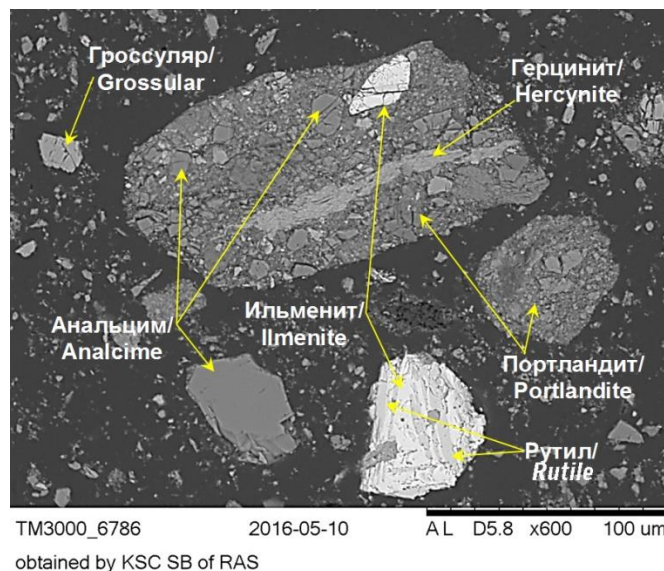


Рис. 1. СЭМ изображение аншлифа образца ферротитанового шлака. Частицы натрий-алюмосиликатного и кальций-алюмосиликатного состава. Агломерат портландита и анальцима. Ильменитовые частицы (белое). Увеличение $\times 600$
Fig. 1. SEM image of ferrotitanium slag polished microsection. Particles of sodium-alumosilicate and calcium-alumosilicate composition. Portlandite-analcime agglomerate. Ilmenite particles (white). 600-fold magnification

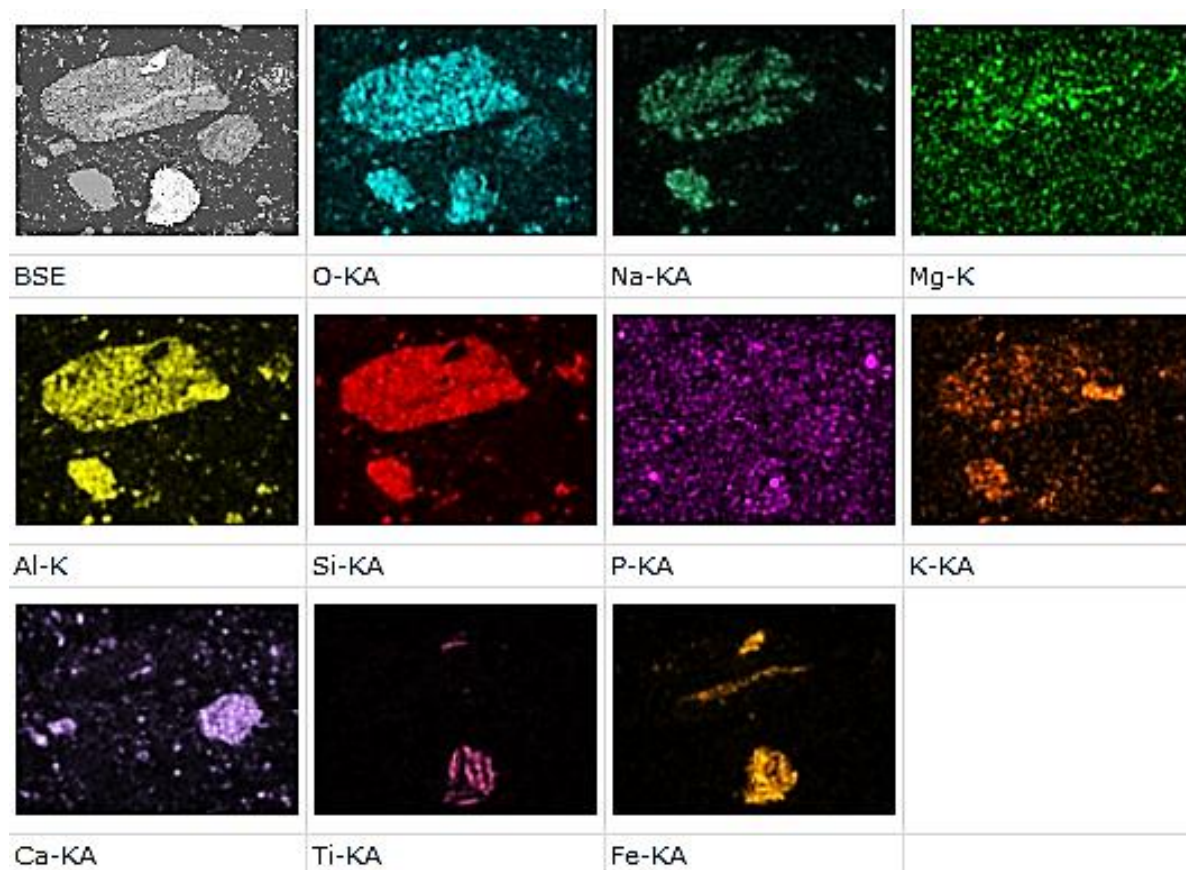


Рис. 2. Карты распределения элементов по области, определяемой рис. 1. Ассоциация железа и титана в рутил-ильменитовой частице. Отдельные кальцийсодержащие частицы (портландит). Мелкие частицы фосфата кальция

Fig. 2. Maps of element distribution by the area specified by fig. 1. Iron and titan association in a rutile-ilmenite particle. Separate calcium-containing particles (portlandite). Small particles of calcium phosphate

Отмечены отдельные частицы фосфатов кальция – брушит ($\text{CaPO}_3(\text{OH}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; $d = 7,61; 3,80; 3,04 \text{ \AA}$; JCPDS; 11-293), и некоторое количество неразрушенных исходных титансодержащих минералов – рутила (TiO_2), псевдобрукита (Fe_2TiO_4), ильменита (FeTiO_3). Исследования показали, что основными алюмосодержащими минералами ферротитанового шлака являются анальцит, монтмориллонит и герцинит, в меньшей степени – железозамещенныйgrossуляр, которые осложняют переработку данного техногенного материала.

Для изучения поведения минералов шлака при нагревании с известняком были проведены термохимические исследования с использованием дериватографа. Дериватограмма шихты ферротитанового шлака с добавлением 50 % масс. кальцита приведена на рис. 4.

На ДТА-кривой ферротитанового шлака с добавлением 50 % масс. известняка отмечается низкотемпературный эндотермический пик в районе 280°C (см. рис. 4), который сопровождается потерей около 3% массы образца. Данный эффект соответствует разложению портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) до CaO с удалением воды. Эндозффект при 830°C так же, как и для текущей нефелиновой шихты, связан с терморазложением добавленного кальцита до CaO и сопровождается потерей массы образца ($\Delta m = 21,3\%$ навески), что соответствует удалению карбонатного CO_2 . Образец выше этой температуры представлен в основном хорошо окристаллизованным безводным оксидом кальция (CaO) и остатками термостойких фаз (в основном герцинита). Высокотемпературный пик около $1137,5^\circ\text{C}$ соответствует проплавлению об-



разовавшегося двухкальцевого силиката, ответственного за спекание шихты. Температура проплавления для ферротитанового шлака на 20°C ниже таковой для текущей

нефелиновой шихты. На рис. 5 представлена дифрактограмма продуктов нагрева подшихтованного известняком ферротитанового шлака до 1300°C.

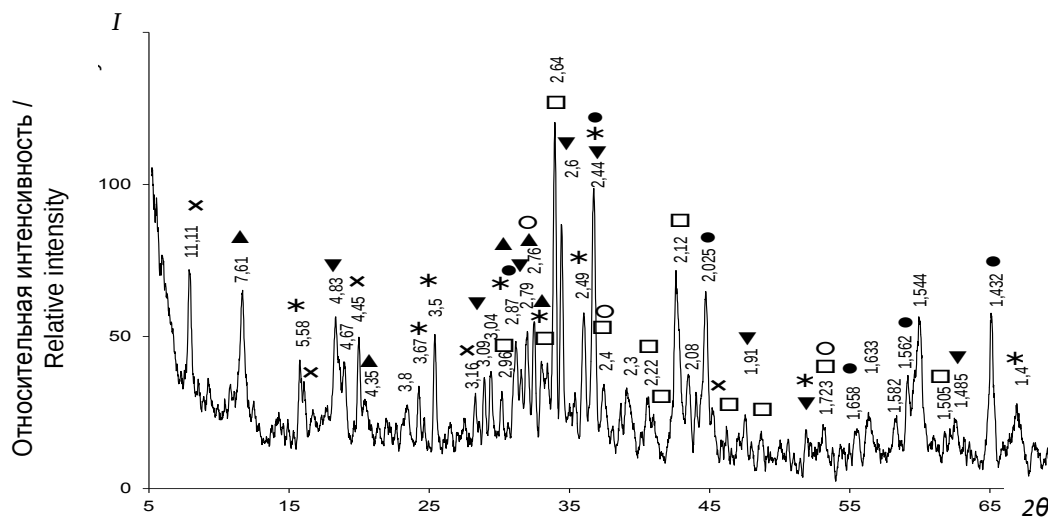


Рис. 3. Фрагмент дифрактограммы ферротитанового шлака с указанием предполагаемых фаз:
X – монтмориллонит $((Al(OH)_2)_{0.33}Al_2(Si_{3.67}Al_{0.33}O_{10})(OH)_2)$; ▼ – портландит $(Ca(OH)_2)$;
□ – гроссуляр $(Ca_3Al_2(SiO_4)_2(OH)_4)$; * – анальцит $(NaSi_2Al)O_6 \cdot H_2O$; • – герцинит $(FeAl_2O_4)$;
▲ – брусшит $(CaPO_3(OH) \cdot 2H_2O)$

Fig. 3. XRD-pattern of ferrotitanium slag with the indication of assumed mineral phases:
X – montmorillonite $((Al(OH)_2)_{0.33}Al_2(Si_{3.67}Al_{0.33}O_{10})(OH)_2)$; ▼ – portlandite $(Ca(OH)_2)$;
□ – grossular $(Ca_3Al_2(SiO_4)_2(OH)_4)$; * – analcime $(NaSi_2Al)O_6 \cdot H_2O$; • – hercynite $(FeAl_2O_4)$;
▲ – brushite $(CaPO_3(OH) \cdot 2H_2O)$

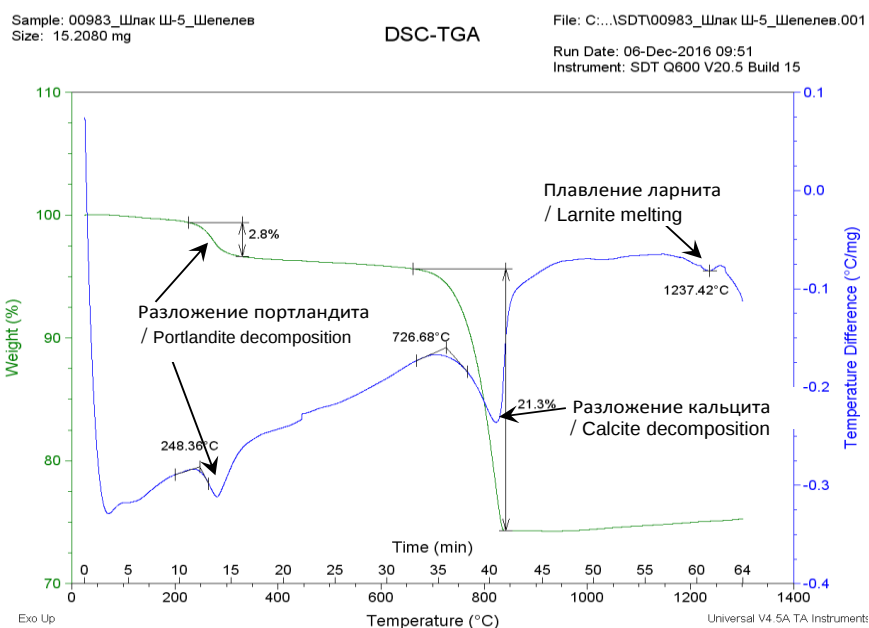


Рис. 4. Дериватограмма шихты ферротитанового шлака и кальцита (1:1)
Fig. 4. Derivatogram of ferrotitanium slag and limestone mixture (1:1)

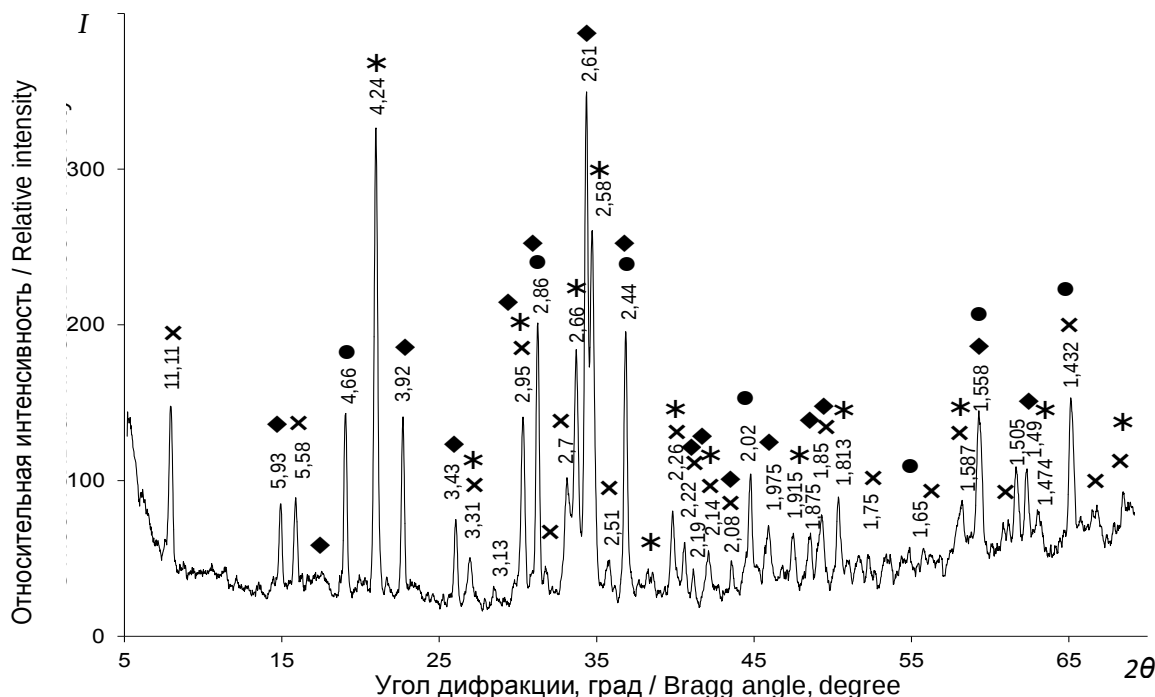


Рис. 5. Фрагмент дифрактограммы продуктов нагрева глиноземной шихты с добавкой ферротитанового шлака до 1300 °С в керамическом тигле дериватографа с указанием предполагаемых фаз: X – дяюдаоит ($\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$); * – алюминат натрия ($\gamma\text{-NaAlO}_2$); • – герцинит (FeAl_2O_4); ♦ – фосфат кальция ($\text{KCa}(\text{PO}_3)_3$)

Fig. 5. XRD-pattern of the calcinations products of limestone-nepheline mixture with ferrotitanium slag additive at 1300°C in a ceramic crucible of the derivatograph furnace with the indication of assumed mineral phases: X – diaoyudaite ($\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$); * – sodium aluminate ($\gamma\text{-NaAlO}_2$); • – hercynite (FeAl_2O_4); ♦ – potassium calcium phosphate ($\text{KCa}(\text{PO}_3)_3$)

Состав продуктов существенно отличается от такового для текущей нефелиновой шихты ввиду несбалансированности шихты по натрию и кремнию. Хорошо проявляются линии алюмината натрия ($\gamma\text{-NaAlO}_2$; $d = 4,24; 2,66; 2,58 \text{ \AA}$; JCPDS; 19-1179), однако линии промежуточного дяюдаоита ($\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$; $d = 11,11; 5,58; 2,7 \text{ \AA}$; JCPDS; 45-1451) сохраняют высокую интенсивность, свидетельствуя о незавершенности перехода из-за недостатка натрия в шихте. Кроме того, высокую интенсивность имеют пики термостойких герцинита (FeAl_2O_4 ; $d = 2,02; 1,558; 1,432 \text{ \AA}$; JCPDS; 7-68) и фосфата кальция ($\text{KCa}(\text{PO}_3)_3$; $d = 5,93; 3,92; 2,61 \text{ \AA}$; JCPDS; 18-998). Наличие данных фаз в исходном шлаке было показано ранее (см. рис. 3). Возможно также наличие гидратированного оксида кальция – портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$;

$d = 3,13; 2,61; 1,915 \text{ \AA}$; JCPDS; 44-1481), образующегося из избыточного безводного оксида кальция при хранении до съемки дифрактограмм. При подшихтовке малых количеств шлака в нефелиновую шихту данные особенности нивелируются.

ДТА-кривые нефелиновой шихты с добавлением 3–5% ферротитанового шлака практически не отличаются от текущей. Дополнительных пиков не проявляется ввиду малой массы добавок. Следует отметить, что продукты нагрева текущей шихты и шихт с добавками ферротитанового шлака менее 1% в условиях анализа проплавляются полностью и стекают на дно керамического тигля, формируя плотные сплавленные стекловидные остатки, тогда как шихты с большими добавками шлака и чисто шлаковые (без нефелина) образуют объемные пористые остатки, и тем более объемные, чем больше доля шлака в ших-



те. Видимо это происходит в результате разложения портландита при низкой температуре, формирующего пористую структуру образца при нагревании. На рис. 6 представлено СЭМ изображение аншлифа измельченного спека сырьевой шихты с добавлением 5% шлака ферротитанового производства. Отмечаются отдельные титансодержащие включения рутила в частице спека. Отмечена концентрация калия в ядре частицы.

При вовлечении в переработку ферротитанового шлака следует учитывать не мономинеральный характер распределения алюминия в шлаке. Аллюмосодержащие минералы представлены, как минимум, двумя видами, поведение которых при спекании существенно различается. Для изучения влияния техногенных добавок при вводе их

в известняково-нефелиновую шихту были проведены исследования по спеканию. Шихты для спекания составляли на основе нефелиновой руды Кия-Шалтырского месторождения, известняка Мазульского месторождения, белого шлама, образующегося в процессе обескремнивания аллюминатных растворов. Химический состав исходных материалов приведен в табл. 1.

Учитывая, что для раскрытия аллюмосодержащих минералов шлака требуется достаточно тонкое измельчение, в технологических экспериментах спекание известняково-нефелиновой шихты проводили с добавлением предварительно измельченного до крупности 100% класса -0,074 мм шлака ферротитанового производства.

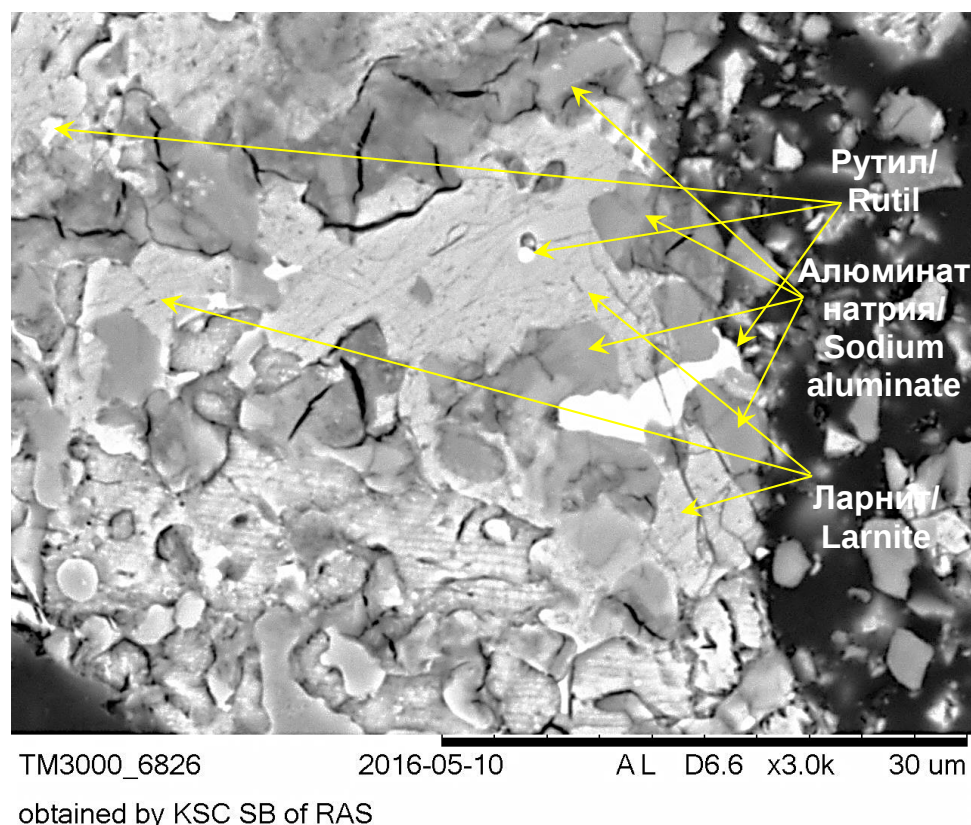


Рис. 6. СЭМ изображение аншлифа измельченного спека сырьевой шихты с добавлением ферротитанового шлака (5%). Включения аллюмината натрия (темное) в двухкальциевом силикате (светло-серое). Частицы рутила (TiO_2) (белое). Увеличение $\times 3000$

Fig. 6. SEM image of sintering product particles of limestone-nepheline mixture with the additions of ferrotitanium slag (5%). Inclusions of sodium aluminate (dark) in larnite (light grey). Rutile particles (TiO_2) (white) 3000-fold magnification



Таблица 1

Химический состав исходных материалов

Table 1

Chemical composition of input materials

Материал / Material	Содержание / Composition, %											
	ППП / LOI*	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	R ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	Cr ₂ O ₃	TiO ₂
Нефелиновая руда / Nepheline ore	4,41	8,61	40,60	1,33	4,90	25,08	12,42	10,63	2,71	0,17	–	–
Известняк / Limestone	42,40	53,20	1,89	1,01	0,50	0,60	–	–	–	0,40	–	–
Белый шлам / White slime	23,83	26,28	12,69	0,67	0,93	21,09	11,12	9,62	2,27	2,00	0,00	–
Fe-Ti шлак / Fe-Ti slag	–	18,72	3,07	2,02	1,06	61,64	0,35	0,26	0,14	0,3	0,06	12,38

*ППП – потери при прокаливании / LOI – Loss On Ignition.

Дозировка сырьевых компонентов на 100 г рудной смеси приведена в табл. 2.

Температура спекания шихт составляла от 1200 до 1300°C.

Условия выщелачивания и характеристики полученных спеков:

- крупность спека – -1+0 мм;
- навеска спека – 25 г;
- количество раствора – 100 мл;
- температура выщелачивания –

75°C;

– содержание щелочи в исходном растворе для условий стандартного выщелачивания – 7 г/л, для технологического выщелачивания – 20 г/л;

– продолжительность стандартного выщелачивания – 15 мин, технологического выщелачивания – 45 мин;

– концентрация Al₂O₃ в алюминатном растворе после стандартного выщелачивания – 32–36 г/л, для технологического выщелачивания – 77–87 г/л;

Таблица 2

Дозировка сырьевых компонентов на 100 г рудной смеси, г

Table 2

Dosing rate of input components per 100 g of ore mixture, g

Шихта / Charge	Нефелиновая руда / Nepheline ore	Fe-Ti шлак / Fe-Ti Slag	Белый шлам / White slime	Известняк / Limestone	Сода / Soda	Сумма / Σ
Без добавления шлака (исходная) / Free from slag addition (initial)	40,36	–	4,04	51,82	3,78	100
С добавлением Fe-Ti шлака, % / With addition of Fe-Ti slag:						
2	39,71	1,07	4,08	50,76	4,38	100
5	39,13	2,06	4,13	49,70	4,98	100
10	37,86	4,21	4,20	47,50	6,23	100



– концентрация R_2O в алюминатном растворе после стандартного выщелачивания – 55–58 г/л, для технологического выщелачивания – 68–74 г/л.

Результаты спекания лабораторных шихт с добавкой шлака ферротитанового производства и полученные данные по усадке материала в процессе спекания, прочности спека и содержанию оксида алюминия в спеке приведены на рис. 7–9.

На рис. 7 приведена зависимость усадки брикетов спека от температуры спекания. Отмечено, что с ростом температуры спекания шихты и количества вводимой добавки ферротитанового шлака возрастает усадка спека.

Более высокие значения по усадке спеков наблюдались при температуре 1275°C и достигали 20–22%. При температуре 1250°C усадка брикетов в процессе спекания исходной шихты составляла 13–14%. При вводе 5% шлака ферротитанового производства такая же степень оплавления спека достигалась при темпе-

ратуре 1250–1260°C, при вводе 10% шлака – при температуре 1240–1250°C. Анализ полученных данных по усадке спеков показал, что ввод шлака ферротитанового производства в количестве 2–3 % масс. в рудные смеси не оказывает существенного влияния на степень оплавления шихты в процессе спекания. Потери массы шихты при спекании при температуре 1200°C составили 25%, при температуре 1275°C – 39%. Отмечено, что с увеличением количества вводимого в сырьевую шихту ферротитанового шлака возрастает прочность спека, причем это наблюдалось для всех применяемых температур спекания (рис. 8).

При введении 5–10% измельченного до 100% класса -0,074 мм шлака ферротитанового производства в шихту увеличивалось содержание оксида алюминия в спеке с 16 до 17,5–18,5% при температуре спекания 1250°C, и с 16,3 до 17,7–18,9% – при температуре 1270°C в зависимости от величины модульных характеристик (рис. 9).

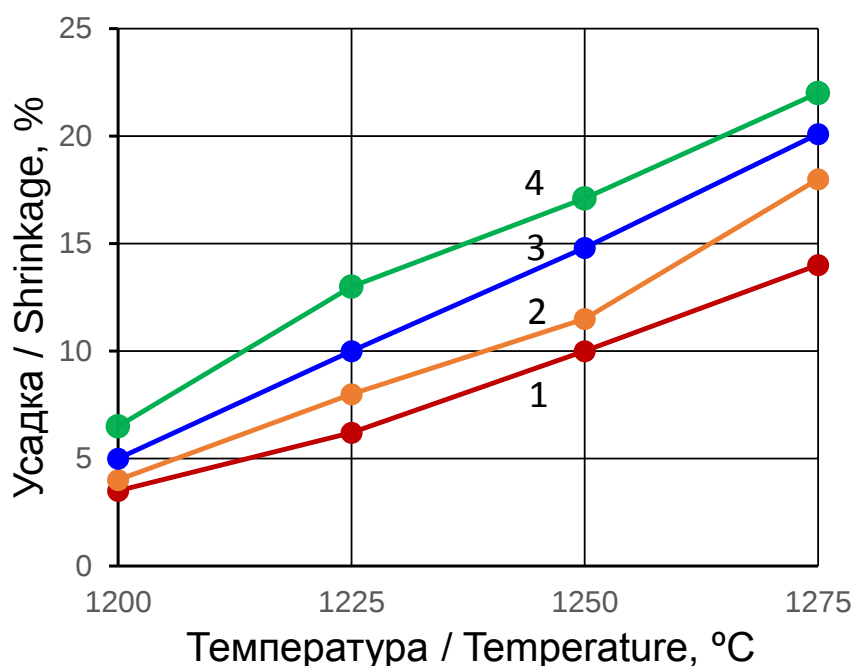


Рис. 7. Зависимость усадки спека от температуры спекания: 1 – шихта без добавки Fe-Ti шлака; 2 – шихта с добавкой 2% Fe-Ti шлака; 3 – шихта с добавкой 5% Fe-Ti шлака; 4 – шихта с добавкой 10% Fe-Ti шлака

Fig. 7. Dependence of sinter shrinkage on sintering temperature: 1 – limestone-nepheline mixture without Fe-Ti slag additions; 2 – limestone-nepheline mixture with addition of 2% (weight) of Fe-Ti slag; 3 – limestone-nepheline mixture with addition of 5% (weight) of Fe-Ti slag; 4 – limestone-nepheline mixture with addition of 10% (weight) of Fe-Ti slag



По результатам лабораторных исследований не выявлено отрицательного влияния ввода шлака на величину химического выхода оксида алюминия при следующих модульных характеристиках спека: $M_{\text{изв.}} = 1,91$; $M_{\text{щел.}} = 1,06$. Вместе с тем снижение дозировки известняка до модульного отношения $\text{CaO/SiO}_2 = 1,82$ или повышение содержания свободной щелочи в шихте при увеличении модульного отношения

$\text{R}_2\text{O/Al}_2\text{O}_3$ до 1,16 в промышленных условиях может привести к повышенному зарастанию зон сушки и спекания, снижению технико-экономических показателей работы печей спекания.

Данные по извлечению глинозема и щелочей при стандартном выщелачивании спеков при различных температурах спекания приведены на рис. 10.

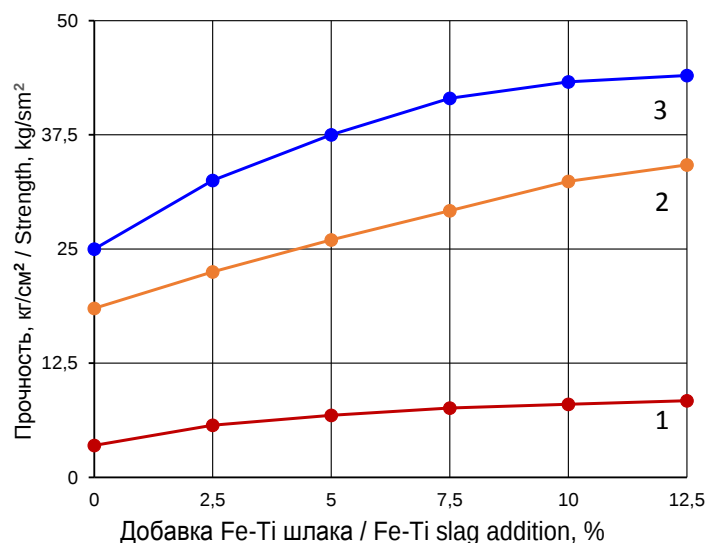


Рис. 8. Зависимость прочности спека от ввода добавки Fe-Ti шлака в шихту при температуре, °C: 1 – 1200; 2 – 1250; 3 – 1270

Fig. 8. Dependence of sinter strength on the addition of Fe-Ti slag to the charge at the temperature of: 1 – 1200 °C; 2 – 1250 °C; 3 – 1270 °C

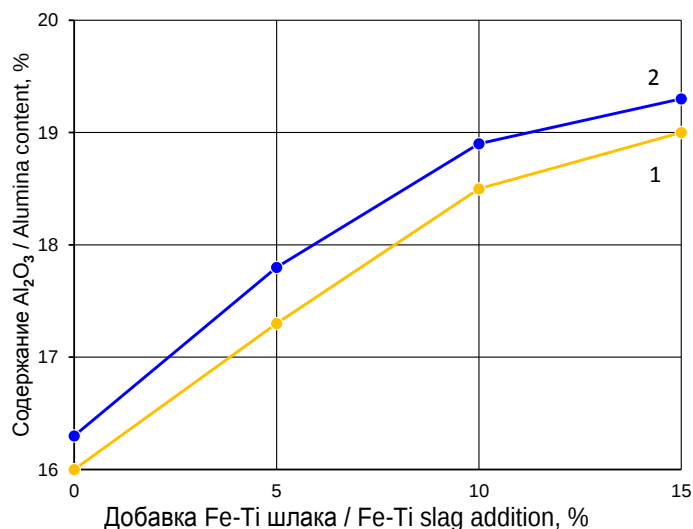


Рис. 9. Зависимость содержания Al_2O_3 в спеке от дозировки шлака ферротитанового производства в известняково-нефелиновую шихту при температуре спекания, °C: 1 – 1250; 2 – 1270

Fig. 9. Dependence of alumina content in sinter on the ferrotitanium slag dosing rate in the limestone-nepheline mixture at the sintering temperature of: 1 – 1250 °C; 2 – 1270 °C



Влияние добавления шлака в известняково-нефелиновую шихту на извлечение глинозема из спека в раствор при различной температуре спекания показывает, что с увеличением количества вводимого шлака извлечение оксида алюминия возрастает. При выщелачивании спека, полученного из известняково-нефелиновой шихты с добавлением 2–5% шлака, извлечение Al_2O_3 выше на 2,5–2,8% по сравнению со спеком шихты без добавления шлака и составило 92,4–93,0% (при температуре спекания 1250°C). Если при технологическом выщелачивании спека, полученного при вводе 2–5% шлака, извлечение Al_2O_3 имело аналогичный характер, то при дозировке 10% шлака наблюдалось некоторое

снижение извлечения Al_2O_3 в интервале температур спекания 1225–1250°C. Отмечено увеличение извлечения щелочей при стандартном выщелачивании при вводе 2–5% ферротитанового шлака при температуре 1250°C. Ввод шлака ферротитанового производства в сырьевую шихту обеспечивал более низкое содержание оксида алюминия в шлаках стандартного и технологического выщелачивания спеков, но при этом было отмечено некоторое увеличение содержания оксида титана в шламе выщелачивания спека, приготовленного с шихтой с добавками шлака, не приводящее к ухудшению качества товарных продуктов.

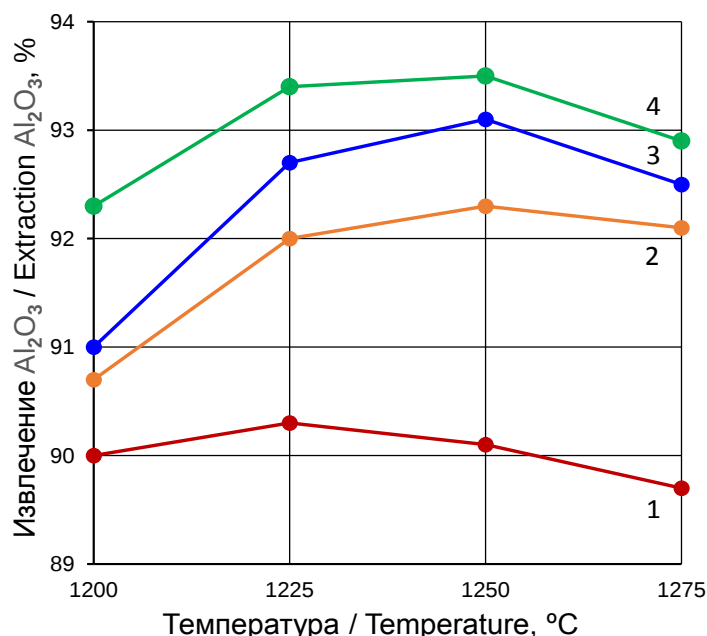


Рис. 10. Зависимость извлечения Al_2O_3 при стандартном выщелачивании спека от температуры спекания: 1 – известняково-нефелиновая шихта; 2 – шихта с добавкой 2% Fe-Ti шлака; 3 – шихта с добавкой 5% Fe-Ti шлака; 4 – шихта с добавкой 10% Fe-Ti шлака

Fig. 10. Dependence of alumina extraction under standard leaching of sinter on sintering temperature: 1 – limestone-nepheline mixture without additions; 2 – limestone-nepheline mixture with addition of 2% (weight) of Fe-Ti slag; 3 – limestone-nepheline mixture with addition of 5% (weight) of Fe-Ti slag; 4 – limestone-nepheline mixture with addition of 10% (weight) of Fe-Ti slag

Заключение

Проведенные термографические исследования ферротитанового шлака и его смеси с содой и известняком при нагревании показали, что температура спекообразования шихты со шлаком находится на

20°C ниже температуры спекообразования известняково-нефелиновой шихты без его добавления. Добавление высокоглиноземистого тонкоизмельченного шлака ферротитанового производства в известняково-



нефелиновую шихту в количестве до 3% приводит к образованию алюмосодержащих минералов (алюмината натрия, джюдаита и герцинита), что обеспечивает более высокие показатели извлечения глинозема при спекании. Результаты технологических испытаний по спеканию шихты с вводом ферротитанового шлака подтвердили результаты термоаналитических исследований. Ввод в шихту 3% шлака ферротитанового производства, измельченного до 100% класса -0,074 мм, увеличивал содержание оксида алюминия в спеке с 16 до

17,5–18,5%. В связи с тем что шлаки являются бесщелочным сырьем, повышенные дозировки шлака (более 5 % масс.) не рекомендуются, так как это приводит к увеличению доли соды, вводимой в шихту для обеспечения щелочного модуля спека. Необходимость повышения оборота содовых растворов при вводе бесщелочного алюминийсодержащего сырья приведет к увеличению свободной щелочи в жидкой фазе шихты. В промышленных условиях это может привести к ухудшению качества спека и снижению выпуска соды.

Библиографический список

1. Сизяков В.М. 80 лет алюминиевой промышленности России (историко-аналитический обзор) // Цветные металлы. 2012. № 5. С. 76–84.
2. Matjie R H, Bunt J R, Van H. Extraction of Alumina from Coal Fly Ash Generated from a Selected Low Rank Bituminous South African Coal // Minerals Engineering. 2005. Vol. 18. Issue 3. P. 299–310.
3. Yao Z.T., Xia M.S., Sarker P.K. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China // Fuel. 2014. Vol. 120. P. 74–85.
4. Сизяков В.М. Современное состояние и проблемы развития алюминиевой промышленности России // Записки горного института. 2006. Т. 163. С. 163–170.
5. Roelof Den Hond, Iwan Hiralal, Ab Rijkeboer. Alumina Yield in the Bayer Process; Past, Present and Prospects // Light Metals. 2007. P. 3742–3758.
6. Шепелев И.И., Сахачев А.Ю., Александров А.В. и др. Альтернативные направления переработки некондиционного нефелинового сырья // Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья: материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. (Екатеринбург, 19–20 апреля 2017 г.). Екатеринбург: Изд-во ООО «Таилс КО», 2017. С. 244–249.
7. Ни Л.П., Райзман В.Л. Комбинированные способы переработки низкокачественного алюминиевого сырья. Алма-Ата: Наука, 1988. 255 с.
8. Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Lebedev V.A., Ordon S.F. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2013. Vol. 54. No. 2. P. 143–147.
9. Виноградов С.А. Технология совместной переработки нефелинов и бокситов // Записки Горного института, 2007. Т. 170. С. 153–156.
10. Ndlovu S., Simate G.S., Matinde E. Waste Production and Utilization in the Metal Extraction Industry. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2017. 511 p.
11. Zhang L., Zhang L.N., Wang M.Y., Li G.Q., Sui Z.T. Recovery of titanium compounds from molten Ti-bearing blast furnace slag under the dynamic oxidation condition // Minerals Engineering. 2007. Vol. 20. P. 684–693.
12. Holappa L, Xiao Y. Slags in ferroalloy production – review of present knowledge // Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy. 2004. Vol. 104. No. 7. P. 429–437.
13. Головных Н.В., Шепелев И.И., Пихтовников А.Г., Горбачев С.Н. Использование техногенных отходов в глиноземном производстве при переработке нефелинового сырья // Цветные металлы. 2012. № 5. С. 84–88.
14. Cherkasova M.V., Brichkin V.N., Kremcheeva D.A. Recovery of valuable components during co-processing of nepheline concentrates and urtite rocks from Khibini region of Russia // Scientific reports on resource. Issues 2015, Innovations in Mineral Resource Value Chains Freiberg (Germany): Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg, 2015. P. 178–182.
15. Перепелицын В.А., Рывтин В.М., Гильварг С.И. и др. Ферросплавные алюмотермические шлаки. Екатеринбург: Уральский рабочий. 2014. 368 с.
16. Шепелев И.И., Алгебраистова Н.К., Сахачев А.Ю., Жижаев А.М., Прокопьев И.В. Исследование измельчаемости нефелиновой руды и шлака ферротитанового производства для их переработки по спекательной технологии // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 11. С. 167–178.
<https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-167-178>
17. Perepelitsyn V.A., Ponomarenko A.A., Gilvard S.I., Rytvin V.M. Titanium-Alumina Slag – Semifunctional Technogenic Resource of High-Alumina Composition. Part 1. Substance Composition and Titanium-Alumina Slag Properties // Refractories and Industrial Ceramics. 2017. Vol. 58. No. 2. P. 130–135.
<https://doi.org/10.1007/s11148-017-0070-7>
18. Перепелицын В.А., Рывтин В.М., Коротеев В.А. Техногенное минеральное сырье Урала. Екатеринбург: РИО УрО РАН. 2013. 332 с.



References

1. Sizyakov V.M. 80th anniversary of Russian aluminum industry (historical and analytical review). *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2012, no. 5, pp. 76–84. (In Russian).
2. Matjie R H, Bunt J R, Van H. Extraction of Alumina from Coal Fly Ash Generated from a Selected Low Rank Bituminous South African Coal. *Minerals Engineering*. 2005, vol. 18, issue 3, pp. 299–310.
3. Yao Z.T., Xia M.S., Sarker P.K. A review of the alumina recovery from coal fly ash, with a focus in China. *Fuel*. 2014, vol. 120, pp. 74–85.
4. Sizyakov V.M. Modern state and development problems of Russian aluminum industry. *Zapiski gornogo instituta* [Journal of Mining Institute]. 2006, vol. 163, pp. 163–170. (In Russian).
5. Roelof Den Hond, Iwan Hiralal, Ab Rijkeboer. Alumina Yield in the Bayer Process; Past, Present and Prospects. *Light Metals*. 2007. P. 3742–3758.
6. Shepelev I.I., Sakhachev A.Yu., Aleksandrov A.V. [et al.]. *Al'ternativnye napravleniya pererabotki nekon-ditsionnogo nefelinovogo syr'ya* [Alternative directions of off-spec nepheline ore processing]. *Materialy XXII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauchnye osnovy i praktika pererabotki rud i tekhnogenogo syr'ya"* [Materials of XXII International scientific and practical conference "Scientific bases and practice of ore and technogenous raw materials processing"]. Ekaterinburg: Tails Co Publ., 2017, pp. 244–249. (In Russian).
7. Ni L.P., Raizman V.L. *Kombinirovannye sposoby pererabotki nizkokachestvennogo alyu-minievogo syr'ya* [Combined processing methods of low-grade aluminum raw materials]. Alma-Ata: Nauka Publ., 1988, 255 p. (In Russian).
8. Loginova I.V., Kyrchikov A.V., Lebedev V.A., Ordon S.F. Investigation into the question of complex processing of bauxites of the Srednetimanskoe deposit. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. 2013, vol. 54, no. 2, pp. 143–147.
9. Vinogradov S.A. Technology of nepheline and bauxite co-processing. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of Mining Institute]. 2007, vol. 170, pp. 153–156. (In Russian).
10. Ndlovu S., Simate G.S., Matinde E. Waste Production and Utilization in the Metal Extraction Industry. *Boka Raton*: Taylor & Francis, CRC Press, 2017, 511 p.
11. Zhang L., Zhang L.N., Wang M.Y., Li G.Q., Sui Z.T. Recovery of titanium compounds from molten Ti-bearing blast furnace slag under the dynamic oxidation condition. *Minerals Engineering*. 2007, vol. 20, pp. 684–693.
12. Holappa L., Xiao Y. Slags in ferroalloy production – review of present knowledge. *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*. 2004, vol. 104, no. 7, pp. 429–437.
13. Golovnykh N.V., Shepelev I.I., Pikhtovnikov A.G., Gorbachev S.N. Use of technological waste in alumina production at processing nepheline raw. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2012, no. 5, pp. 84–88. (In Russian).
14. Cherkasova M.V., Brichkin V.N., Kremcheeva D.A. Recovery of valuable components during co-processing of nepheline concentrates and urtite rocks from Khibini region of Russia // *Scientific reports on resource. Issues 2015, Innovations in Mineral Resource Value Chains Freiberg (Germany): Medienzentrum der TU Bergakademie Freiberg*, 2015, pp. 178–182.
15. Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Gil'varg S.I. et al. *Ferrosplavnye alyumotermicheskie shlaki* [Ferroalloy aluminothermy slags]. Ekaterinburg: Ural'skii rabochii Publ., 2014, 368 p. (In Russian).
16. Shepelev I.I., Algebrastova N.K., Sakhachev A.Yu., Zhizhaev A.M., Prokop'ev I.V. Grindability study of nepheline ore and ferrotitanium production slag for their processing by sintering technology. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 11, pp. 167–178. (In Russian). <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-11-167-178>
17. Perepelitsyn V.A., Ponomarenko A.A., Gilvard S.I., Rytvin V.M. Titanium-Alumina Slag – Semifunctional Technogenic Resource of High-Alumina Composition. Part 1. Substance Composition and Titanium-Alumina Slag Properties // *Refractories and Industrial Ceramics*. 2017, vol. 58, no. 2, pp. 130–135. <https://doi.org/10.1007/s11148-017-0070-7>
18. Perepelitsyn V.A., Rytvin V.M., Koroteev V.A. *Tekhnogennoe mineral'noe syr'e Urala* [Ural technogenous raw materials]. Ekaterinburg: RIO UrO RAN Publ., 2013, 332 p. (In Russian).

Критерии авторства

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

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interest

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 665.075

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-234-243>

МЕТОДИКИ И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГРУЗОВЫХ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ В УСЛОВИЯХ ХОЛОДНОГО КЛИМАТА

© С.П. Озорнин¹, И.А. Тарасов²

Забайкальский государственный университет,
672039, Российская Федерация, Забайкальский край, г. Чита, ул. Александро-Заводская, 30.

РЕЗЮМЕ. Существующие методики корректировки периодичности проведения работ технического сервиса не в полной мере учитывают негативное влияние факторов, от которых зависит эффективность работы грузовых автотранспортных средств (ГАТС) и безопасность водителей на маршруте. Проблема обеспечения эффективности использования ГАТС и безопасности водителей в сложных эксплуатационных условиях весьма актуальна. **ЦЕЛЮ** работы являлось формирование уровней жесткости условий эксплуатации ГАТС в зависимости от факторов, лимитирующих их эксплуатационную надежность, а также совершенствование методики корректировки периодичности проведения технического обслуживания (ТО) с использованием средств удаленного диагностирования. **МЕТОДЫ.** В работе использованы: априорное ранжирование, корреляционно-регрессионный анализ, методы определения темпов накопления нагрузочного воздействия транспортных средств. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Выявлено четыре уровня жесткости условий эксплуатации: приемлемый, усредненный, увеличенный и критический. Получены математические модели, подтверждающие их существование. Определены значения уровня нагрузочного воздействия при различных уровнях жесткости условий эксплуатации ГАТС. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты дают возможность формировать коэффициенты корректировки режимов проведения ТО для различных марок и моделей ГАТС с учетом условий эксплуатации.

Ключевые слова: грузовые автотранспортные средства, уровни жесткости условий эксплуатации, эффективность, безопасность, технический сервис.

Информация о статье. Дата поступления 13 февраля 2018 г.; дата принятия к печати 15 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Озорнин С.П., Тарасов И.А. Методики и результаты оценки эффективности эксплуатации грузовых автотранспортных средств в условиях холодного климата // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 234–243. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-234-243

METHODS AND RESULTS OF CARGO TRANSPORT OPERATION EFFICIENCY EVALUATION IN COLD CLIMATES

S.P. Ozornin, I.A. Tarasov

Transbaikal State University,
30, Aleksandro-Zavodskaya St., Chita, Transbaikal region, 672039, Russian Federation

ABSTRACT. Existing methods of maintenance periodicity adjustment don't take full account of the negative impact of factors on which the operation efficiency of cargo transport and drivers' safety on the route depends. The problem of ensuring the efficient use of cargo transport and drivers' safety in complex operating conditions is highly relevant. The **PURPOSE** of the work is formation of the severity levels of cargo transport operating conditions depending on the factors that limit their reliability, as well as improvement of the methodology of maintenance periodicity adjustment using remote diagnostic tools. **METHODS.** The study uses an a priori ranking method, a correlation-regression analysis as well as the methods for determining the accumulation rates of the vehicle load effect. **RESULTS.** Four levels of operation condition

¹Озорнин Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор кафедры строительных и дорожных машин, e-mail: s.ozornin2013s@ya.ru

Sergey P. Ozornin, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Construction and Road-Making Machinery, e-mail: s.ozornin2013s@ya.ru

²Тарасов Илья Александрович, аспирант, e-mail: 3022_0602@mail.ru

Ilya A. Tarasov, Postgraduate, e-mail: 3022_0602@mail.ru



severity have been identified including acceptable, averaged, increased and critical. The mathematical models confirming their existence have been obtained. The values of the load effect for the different severity levels of cargo transport operation have been determined. **CONCLUSION.** The results obtained provide an opportunity to form the maintenance mode adjustment factors for different brands and models of cargo transport taking into account the operating conditions.

Keywords: cargo transport, severity levels of operating conditions, efficiency, safety, maintenance

Information about the article. Received February 13, 2018; accepted for publication March 15, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Ozornin S.P., Tarasov I.A. Methods and results of cargo transport operation efficiency evaluation in cold climates. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 234–243. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-234-243

Введение

Обеспечение эффективной и безопасной эксплуатации грузовых автотранспортных средств (ГАТС) в условиях холодного климата требует принятия современных решений в организации процессов технического сервиса.

С целью выявления причин возникновения отказов необходимо произвести ранжирование факторов, негативно влияющих на эксплуатационную надежность

ГАТС, с помощью корреляционно-регрессионного анализа. В настоящей работе оценка степени влияния наиболее значимых факторов, оказывающих негативное воздействие, выполнена методом априорного ранжирования, основанного на экспертной оценке этих факторов специалистами, компетентными в данной области³ [1].

Ранжирование факторов условий эксплуатации ГАТС

В проведении ранжирования факторов условий эксплуатации приняли участие восемь экспертов, занимающих должности инженерно-технических и научных работников на предприятиях сервиса ГАТС в Забайкальском крае: «Научно-образовательный центр проблем транспорта и сервиса машин Забайкальского государственного университета», ООО «Байкалавто-трак», группа Volvo Truck, ООО «Читаскан-сервис», ООО «Уральский технический центр».

По результатам выполненного исследования можно утверждать, что факторы условий эксплуатации, оказывающие негативное влияние на изменение технического состояния ГАТС, по степени влияния распределились следующим образом:

1 – климатические условия (Climatic conditions);

2 – состояние дорожного покрытия (Road surface);

3 – качество технического сервиса (Quality of technical service);

4 – использование грузоподъемности ГАТС (Cargo transport carrying capacity using).

Для подтверждения значимости выявленных факторов в рамках научно-технического сотрудничества Научно-образовательного центра проблем транспорта и сервиса машин ЗабГУ с компанией ООО «С-Телеком» проведен пассивный статистический эксперимент с использованием технических и программных средств удаленного мониторинга условий эксплуатации и изменений технического состояния ГАТС.

В качестве наблюдаемых объектов были выбраны восемнадцать ГАТС парка

³Макарова Л.В. Технология экспертной оценки: метод. указания к практ. занятиям по дисциплине «Квалиметрия и управление качеством». Пенза: Изд-во ПГУАС, 2003. 16 с. / Makarova L.V. Expert judgement technology: methodical instructions for practical classes on the discipline "Qualimetry and Quality Management". Penza: Penza State University of Architecture and Construction Publ., 2003, 16 p.



ОАО «Водоканал–Чита». Основным видом работ этих ГАТС является перевозка габаритных, штучных и сыпучих грузов в условиях города Читы и за его пределами. Эксперимент проводился в течение 2016 года. Информация об отказах элементов ГАТС (узлов и агрегатов), фиксировалась в ремонтных листах на станции обслуживания ОАО «Водоканал–Чита», обработанные сведения представлены в табл. 1.

Для формирования уровней жесткости условий эксплуатации проведен корреляционно-регрессионный анализ значимости выявленных факторов в зависимости от числа отказов наблюдаемых ГАТС⁴ [2]. Получены зависимости количества отказов от климатических условий, состояния дорожного покрытия, качества технического сервиса и фактического использования грузоподъемности ГАТС. Анализ данных проводился с использованием стандартных программ Microsoft Excel 2010 и STATISTICA 10.

Для формирования уровней жесткости условий эксплуатации проведен корреляционно-регрессионный анализ значимости выявленных факторов в зависимости от числа отказов наблюдаемых ГАТС⁴ [2]. Получены зависимости количества отказов от климатических условий, состояния дорожного покрытия, качества технического сервиса и фактического использования грузоподъемности ГАТС. Анализ данных проводился с использованием стандартных программ Microsoft Excel 2010 и STATISTICA 10.

Таблица 1

Статистические данные, собранные по наблюдаемым объектам

Table 1

Statistical data on the objects under investigation

Марка ГАТС/ Cargo transport brand	Модель ГАТС / Cargo transport model	Количество отказов / Number of failures	Годовой пробег, км / Annual mileage, km	Количество ТО / Number of maintenances	
				ТО-1 / MAINT-1	ТО-2 / MAINT-2
КамАЗ / KamAZ	66064	12	31279	2	1
КамАЗ / KamAZ	4308	17	538	–	–
КамАЗ / KamAZ	55111	13	25018	2	1
ЗиЛ / ZiL	431412	15	40809	2	1
КамАЗ / KamAZ	53215	15	13090	1	–
КамАЗ / KamAZ	4308	13	4845	–	–
Гуран / Guran	2318	9	8923	1	–
КамАЗ / KamAZ	53213	13	13214	1	–
КамАЗ / KamAZ	43253	14	19147	1	1
КамАЗ / KamAZ	53215	9	32124	2	1
ГАЗ / GAZ	47531	12	28201	2	1
Гуран / Guran	2318	13	13230	1	1
ГАЗ / GAZ	475403	10	33106	2	1
Урал / Ural	661878	24	13004	1	–
ГАЗ / GAZ	475403	10	37777	2	1
ЗиЛ / ZiL	431412	9	49317	2	1
КамАЗ / KamAZ	53213	6	12974	1	–
КамАЗ / KamAZ	53213	5	13506	1	1

³Макарова Л.В. Технология экспертной оценки: метод. указания к практ. занятиям по дисциплине «Квалиметрия и управление качеством». Пенза: Изд-во ПГУАС, 2003. 16 с. / Makarova L.V. Expert judgement technology: methodical instructions for practical classes on the discipline "Qualimetry and Quality Management". Penza: Penza State University of Architecture and Construction Publ., 2003, 16 p.

⁴Федотов А.И. Методика подготовки диссертации: учеб.-метод. пособие для аспирантов и докторантов специальности 05.22.10 «Эксплуатация автомобильного транспорта». Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2016. 188 с. / Fedotov A.I. Methodology for thesis preparation: methodological study guide for postgraduate students and Doctoral students on the specialty 05.22.10 "Motor Transport Operation". Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2016, 188 p.



После завершения регрессионного анализа определены математические уравнения, по которым возможно прогнозировать количество отказов в зависимости от вышеописанных факторов с применением методик из источников³ [2, 3].

Так как влияние климатических условий обусловлено воздействием на техническое состояние ГАТС низких температур [3], анализ проводился по этому критерию. Произведена выборка общего количества отказов и средних значений температур окружающей среды в момент наступления отказа. Полученные статистические данные представлены на рис. 1, а результаты анализа – в табл. 2.

Таким образом, математическая мо-

дель, по которой можно прогнозировать количество отказов для всех наблюдаемых объектов (ГАТС), примет следующий вид:

$$n = 1,20116 - 0,13528 \cdot t,$$

где n – общее количество отказов; t – значение температуры окружающей среды.

Фактор «качество технического сервиса» условно охарактеризован суммарным количеством технических обслуживаний (ТО-1 и ТО-2), выполненных в 2016 г. для каждой наблюдаемой единицы ГАТС. По аналогии с предыдущим вариантом проведен регрессионный анализ, результаты которого сведены в табл. 3 и отражены на рис. 2.

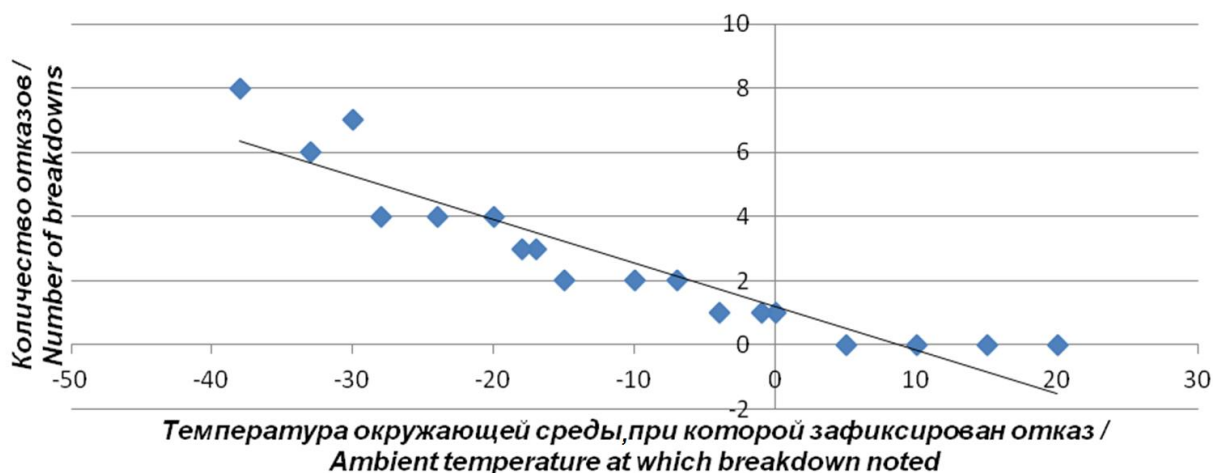


Рис. 1. Количество отказов ГАТС при различных значениях температуры окружающей среды
Fig. 1. Number of cargo transport failures at different ambient temperatures

Таблица 2

Результаты корреляционно-регрессионного анализа по фактору
«климатические условия»

Table 2

Results of the correlation-regression analysis by the factor "climatic conditions"

Показатель / Factor	Значение / Value
Коэффициент корреляции, r / Correlation coefficient, r	-0,931
Связь по шкале Чеддока / Cheddok scale correlation	весьма высокая / very high
Число степеней свободы, f / Degrees of freedom number, f	16
Критическое значение t -критерия Стьюдента / Student's t -test critical value	-10,229
Уравнение парной линейной регрессии / Equation of pairwise linear regression	$y = 1,20116 - 0,13528 \cdot x$
Коэффициент детерминации r^2 / Coefficient of determination	0,867



Таблица 3

Результаты регрессионного анализа «количество отказов – качество технического сервиса»

Table 3

Results of the “number of failures – technical service quality” regression analysis

Показатель / Factor	Значение / Value
Коэффициент корреляции, r / Correlation coefficient, r	-0,306
Связь по шкале Чеддока / Cheddok scale correlation	Умеренная / moderate
Число степеней свободы, f / Degrees of freedom number, f	16
Критическое значение t -критерия Стьюдента / Student's t -test critical value	-1,286
Уравнение парной линейной регрессии / Equation of pairwise linear regression	$y = 14,47215 - 1,18568 \cdot x$
Коэффициент детерминации, r^2 / Coefficient of determination, r^2	0,094

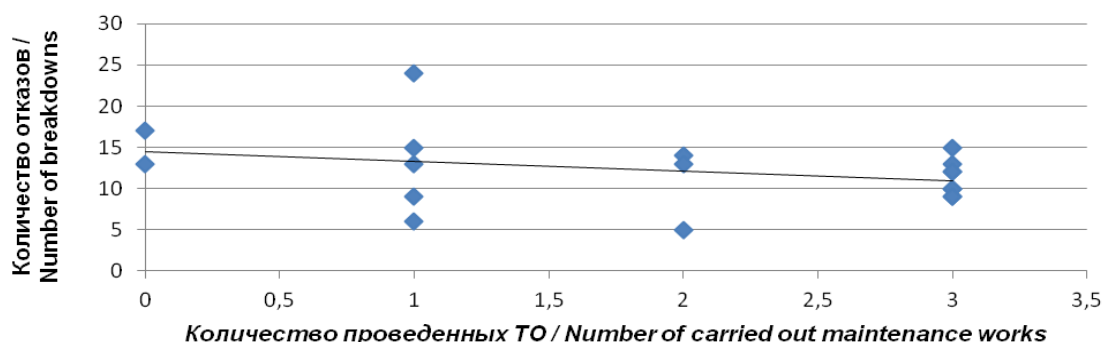


Рис. 2. Количество отказов ГАТС в зависимости от количества ТО

Fig. 2. Number of cargo transport failures depending on the number of maintenance works

Математическая модель для этого фактора имеет вид:

$$n = 14,47215 - 1,18568 \cdot N_{ТО},$$

где $N_{ТО}$ – количество проведенных ТО.

Для анализа влияния факторов «использование грузоподъемности ГАТС» и «состояние дорог» использованы такие

критерии, как коэффициент использования грузоподъемности в момент наступления отказа и категория дороги, на которой во время эксплуатации ГАТС произошел отказ. Результаты наблюдений представлены на рис. 3, 4, а результаты регрессионного анализа сведены в табл. 4, 5.

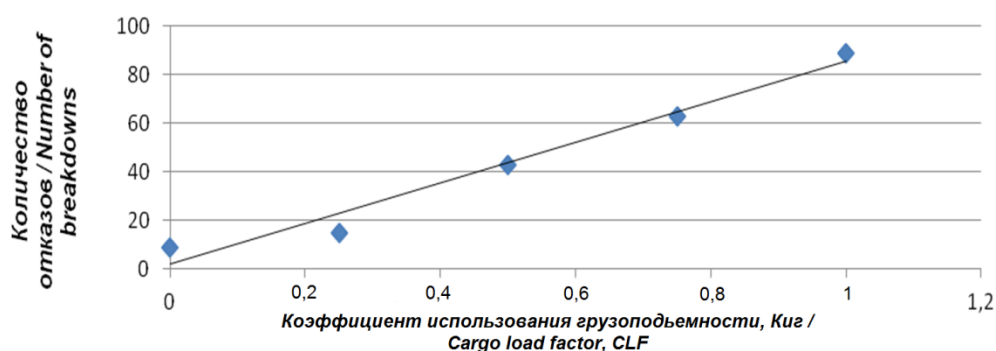


Рис. 3. Количество отказов ГАТС в зависимости от коэффициента использования грузоподъемности ГАТС

Fig. 3. Number of cargo transport failures depending on the cargo load factor



Таблица 4

Результаты регрессионного анализа «количество отказов – коэффициент использования грузоподъемности ГАТС»

Table 4

Results of the “number of failures – cargo load factor” regression analysis

Показатель / Factor	Значение / Value
Коэффициент корреляции, r / Correlation coefficient, r	0,986
Связь по шкале Чеддока / Cheddok scale correlation	весьма высокая / very high
Число степеней свободы, f / Degrees of freedom number, f	3
Критическое значение t -критерия Стьюдента / Student's t -test critical value	10,133
Уравнение парной линейной регрессии / Equation of pairwise linear regression	$y = 2,20000 + 83,20000 \cdot x$
Коэффициент детерминации, r^2 / Coefficient of determination, r^2	0,972

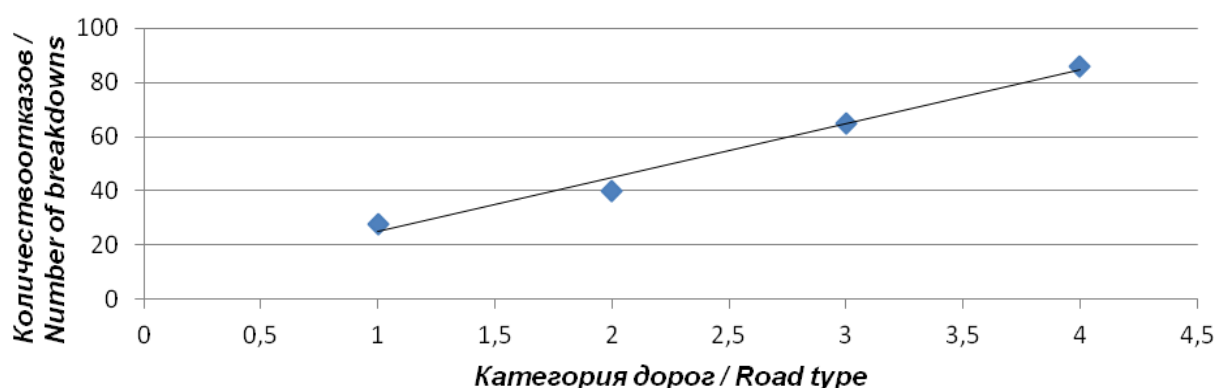


Рис. 4. Количество отказов ГАТС от категории дорог

Fig. 4. Number of cargo transport failures depending on the road type

Таблица 5

Результаты регрессионного анализа «количество отказов – категория дорог»

Table 5

Results of the “number of failures – road type” regression analysis

Наименование показателя / Factor	Значение / Value
Коэффициент корреляции, r / Correlation coefficient, r	0,991
Связь по шкале Чеддока / Cheddok scale correlation	Функциональная / Functional
Число степеней свободы, f / Degrees of freedom number, f	2
Критическое значение t -критерия Стьюдента / Student's t -test critical value	10,683
Уравнение парной линейной регрессии / Equation of pairwise linear regression	$y = 5,00000 + 19,90000 \cdot x$
Коэффициент детерминации, r^2 / Coefficient of determination, r^2	0,983

Таким образом, факторы, выявленные в результате априорного ранжирования, действительно влияют на техническое состояние ГАТС. Это подтверждается главным образом тем, что связь между количе-

ством отказов ГАТС, наблюдаемых в ходе эксперимента, и этими факторами высокая и функциональная.

Результаты априорного ранжирования и корреляционно-регрессионного ана-



лиза стали предпосылками создания схемы оценки влияния вышеописанных факторов на изменение технического состояния ГАТС и разграничения уровней жесткости условий эксплуатации [4].

Под жесткостью условий эксплуатации понимается совокупность внешних воздействий и условий функционирования, вызывающих изменение технического состояния машин [5]. Определены четыре уровня жесткости условий эксплуатации ГАТС: приемлемый; усредненный; увеличенный; критический. Каждому уровню жесткости условий эксплуатации соответствуют факторы, имеющие свои критерии оценки (табл. 6). Критерием оценки жестко-

сти условий эксплуатации и переменной составляющей для определения остаточного ресурса ГАТС является уровень нагрузочного воздействия.

Результаты определения значений накопленной величины уровня нагрузочного воздействия на ГАТС формировались с помощью работы в комплексе программ СКАУТ Эксплорер 3.5, Microsoft Office Excel 2007 и STATISTICA 10. Расчет величин коэффициентов суммарного сопротивления движению Ψ_i при эксплуатации в различных условиях осуществлялся с помощью формирования расчетных значений средней скорости и среднего расхода топлива ГАТС [6, 7].

Таблица 6

Уровни жесткости условий эксплуатации ГАТС

Table 6

Severity levels of cargo transport operating conditions

Уровень жесткости условий эксплуатации ГАТС / Severity levels of cargo transport operating conditions	Условия эксплуатации ГАТС/ Cargo transport operating conditions			
	Условия использования грузоподъемности ГАТС (значение коэффициента использования грузоподъемности) / Conditions of cargo transport load capacity use (Cargo load factor value)	Качество технического сервиса / Quality of maintenance	Природно-климатические условия (значение температуры окружающей среды) / Climatic conditions (ambient temperatures)	Категория дорог / Type of road
Приемлемый / acceptable,	0,25	ТО и Р в полном объеме и в срок / Full maintenance and repair in time	В интервале от +15 до +5 С° / from +15 to +5 С° temperature range	Первая / The first
Усредненный / averaged	0,5	ТО и Р в полном объеме, но с нарушением периодичности / Full maintenance and repair but with failed periodicity	В интервале от +5 до -15 С° / from +5 to -15 С° temperature range	Вторая / The second
Увеличенный / increased	0,75	ТО и Р частично, с нарушением периодичности / Partial maintenance and repair with failed periodicity	В интервале от -15 до -30 С° / from -15 to -30 С° temperature range	Третья / The third
Критический / critical	1	ТО и Р не проводится / Maintenance and repair are not carried out	В интервале от -30 до -50 С° / from -30 to -50 С° temperature range	Четвертая / The fourth



Пример. Назначенный пробег ГАТС (КамАЗ 55111) до капитального ремонта – 280000 км. Коэффициент суммарного сопротивления движению ГАТС $\Psi_i = 0,025$.

При расчете Ψ_i для каждого вида перевозок необходимо определить коэффициент пропорциональности:

$$n = \frac{\Psi_A \cdot V_Q}{Q_{cp}}, (H/л \cdot ч), \quad (1)$$

где V_Q – средняя скорость ГАТС; Q_{cp} – средний расход топлива ГАТС, л/100 км;

$$n = \frac{0,025 \cdot 28,4}{30,4} = 0,023; (H/л \cdot ч).$$

Фактические значения коэффициента суммарного сопротивления движению ГАТС определены профилем и несущей способностью опорной поверхности [8], средним расходом топлива и средней скоростью движения ГАТС по выражению

$$\Psi_j = k \frac{Q_i}{V_i}; \quad (2)$$

- 1) $\Psi_{\Sigma 1} = 0,023 \cdot \frac{39,8}{13,3} = 0,06$;
- 2) $\Psi_{\Sigma 2} = 0,023 \cdot \frac{36,7}{17,2} = 0,04$;
- 3) $\Psi_{\Sigma 3} = 0,023 \cdot \frac{33,4}{21,4} = 0,03$;
- 4) $\Psi_{\Sigma 4} = 0,023 \cdot \frac{30,4}{28,4} = 0,02$;

После расчета коэффициентов суммарного сопротивления движению ГАТС (для заданных ситуаций) рассчитывался уровень нагрузочного воздействия [9] с учетом коэффициента использования грузоподъемности [10]:

$$W_i = \Psi_{\Sigma j} \cdot L_i \cdot \gamma_c, H \cdot км;$$

$$W_1 = 0,06 \cdot 1561 \cdot 1 = 93,66;$$

$$W_2 = 0,04 \cdot 1623 \cdot 0,75 = 48,69;$$

$$W_3 = 0,03 \cdot 1780 \cdot 0,5 = 26,77;$$

$$W_4 = 0,02 \cdot 1923 \cdot 0,25 = 9,61.$$

Аналогично выявлена зависимость среднего расхода топлива ГАТС от уровня нагрузочного воздействия (рис. 6).

Фактический пробег ГАТС определен следующим образом:

$$L_{\text{факт}} (\text{ГАТС}) = \frac{\sum_{j=1}^n W_j}{\Psi_{\Sigma}} =$$

$$= \frac{93,66 + 48,69 + 26,77 + 9,61}{0,06} = 2978, \text{ км.}$$

Остаточный ресурс определен как разность статистически определенного минимального пробега до наступления отказа (для заданных условий эксплуатации) и фактического пробега ГАТС:

$$\Delta L = L_{\text{СТАТ}} - L_{\text{ФАКТ}} = 3450 - 2978 = 472, \text{ км.}$$

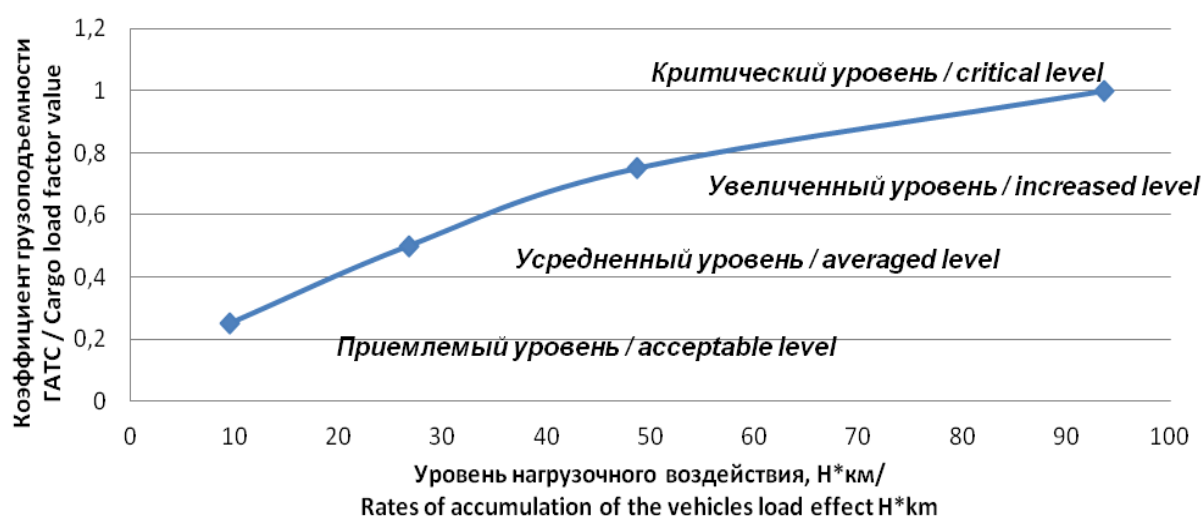


Рис. 5 Зависимость уровня нагрузочного воздействия от коэффициента использования грузоподъемности ГАТС

Fig. 5 Dependence of the load effect level on the cargo load factor



Рассчитан остаточный ресурс ГАТС к завершению перевозки угля в зимнее время года по маятниковому маршруту общей протяженностью 1479 км с коэффициентом суммарного сопротивления для данных условий эксплуатации $\Psi_{\Sigma n} = 0,04$ и фактическим пробегом $L_{\text{ФАКТ}} = 1200$ км.

$$\begin{aligned} \Delta L &= (L_{\text{КР}} - L_{\text{ФАКТ}}) - \frac{\Psi_{\text{пр}} \cdot L_n}{\Psi_{\Sigma}} \\ &= (3450 - 1200) - \frac{0,04 \cdot 1479}{0,06} \\ &= 1264, \text{ км.} \end{aligned}$$

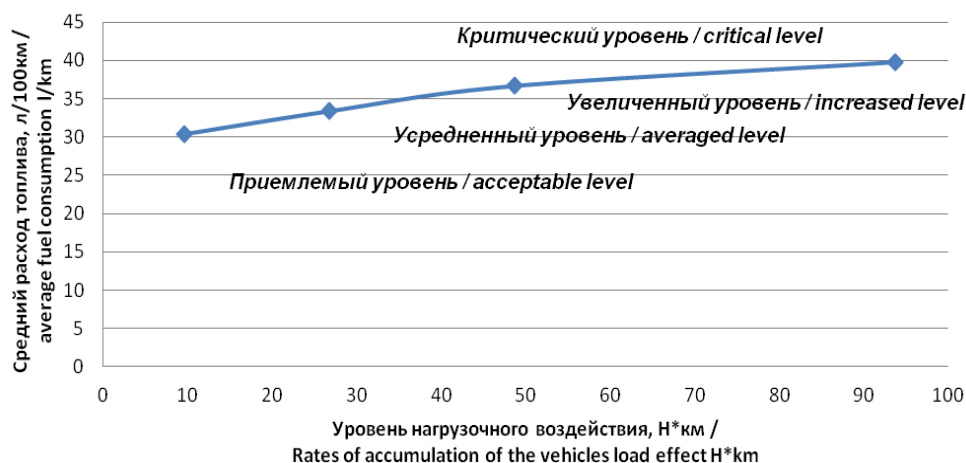


Рис. 6 Зависимость среднего расхода топлива от уровня нагрузочного воздействия на ГАТС
Fig. 6 Dependence of the average fuel consumption on the level of the cargo transport load effect

Заключение

В результате проведенного исследования сформированы четыре уровня жесткости условий эксплуатации ГАТС в районах холодного климата, правомерность существования которых подтверждена корреляционно-регрессионным анализом. Основным показателем жесткости условий эксплуатации является уровень нагрузочного воздействия. Внедрение подсистемы удаленного мониторинга в систему технического сервиса дает возможность

определять уровень нагрузочного воздействия дистанционно во время работы ГАТС на маршруте. Накопленное значение уровня нагрузочного воздействия дает возможность определять остаточный ресурс ГАТС, корректировать режимы ТО и Р, повышая тем самым надежность и эффективность эксплуатации ГАТС при их использовании в условиях холодного климата, а также уровень безопасности водителей на маршруте.

Библиографический список

1. Codd E.F., Codd S.B., Salley C.T. Providing OLAP (On-line Analytical Processing) to User-Analysts: An IT Mandate. Codd & Date, Inc, 1993. Retrieved on 2008-12-11.
2. Johansen S. Statistical Analysis of Cointegrating Vectors // Journal of Economic Dynamics and Control. 2005. No. 12. P. 96–111.
3. Резник Л.Г. Индекс суровости условий эксплуатации машин // Нефть и газ. 2000. № 1. С. 112–116.
4. Озорнин С.П. Организация и технология фирменного сервиса транспортных и технологических машин: монография; в 2 ч. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2013.

- Ч. 1. 210 с.
5. Бердников И.Е. Оценка жесткости условий эксплуатации машин // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов: материалы XV Междунар. науч.-практ. конф.; в 3 ч. (Чита, 28–30 ноября 2015 г.). Чита: Изд-во ЗабГУ, 2015. Ч. I. С. 156–160.
6. Бердников И.Е. Мониторинг изменения технического состояния машин в эксплуатации // Молодёжная научная весна в ЗабГУ – 2014: XLI практическая конференция студентов, магистрантов и аспирантов Забайкальского государственного университета: сб.



материалов; в 2 ч. (Чита, 23–28 марта 2014 г.). Чита: Изд-во ЗабГУ, 2014. Ч. II. С. 12–15.

7. Пат. 2129711 Российская Федерация, МПК G01M17/00. Способ контроля показателей надежности транспортного средства / А.Н. Вознесенский, В.С. Устименко, Н.М. Балин.; заявитель и патентообладатель: А.Н. Вознесенский, В.С. Устименко, Н.М. Балин. № 97114264/28; заявл. 20.08.1997; опубл. 27.04.1999. Бюл. № 23. Ч. II.
8. Озорнин С.П. Современная парадигма эксплуатации транспортно-технологических машин: моногра-

фия. Чита: Изд-во ЗабГУ, 2017. 195 с.

9. Алыгин В.Б. Система основных расчетных задач при проектировании автомобиля // Наука – инновационному развитию общества: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (Минск, 22–23 января 2009 г.). Минск: Беларуская навука, 2009. С. 188–207.
10. Миргородский М.А., Витвицкий Е.Е. Методика выбора подвижного состава при перевозке грузов мелкими отправлениями в городах // Автотранспортное предприятие. 2009. № 6. С. 45–48.

References

1. Codd E.F., Codd S.B., Salley C.T. Providing OLAP (On-line Analytical Processing) to User-Analysts: An IT Mandate. Codd & Date, Inc, 1993. Retrieved on 2008-12-11.
2. Johansen S. Statistical Analysis of Cointegrating Vectors. Journal of Economic Dynamics and Control. 2005, no. 12, pp. 96–111.
3. Reznik L.G. Severity index of machinery operating conditions. *Neft' i gaz* [Oil and gas]. 2000, no. 1, pp. 112–116. (In Russian).
4. Ozornin S.P. *Organizatsiya i tekhnologiya firmennogo servisa transportnykh i tekhnologicheskikh mashin* [Organization and technology of transport and technological machinery branded maintenance]. Chita: Transbaikal State University Publ., 2013, part 1, 210 p. (In Russian).
5. Berdnikov I.E. *Otsenka zhestkosti uslovii ekspluatatsii mashin* [Evaluation of the severity of machine operating conditions]. *Materialy XV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Kulaginskie chteniya: tekhnika i tekhnologii proizvodstvennykh protsessov"* [Materials of XV International Scientific and Practical Conference "Kulagin's Readings: Equipment and Technologies of Production Processes"]. Chita: Transbaikal State University Publ., 2015. Part 1, pp. 156–160. (In Russian).
6. Berdnikov I.E. *Monitoring izmeneniya tekhnicheskogo sostoyaniya mashin v ekspluatatsii* [Monitoring of changes in machinery technical condition when in operation]. *Sbornik materialov XLI prakticheskoi konfer-*

Критерии авторства

Озорнин С.П., Тарасов И.А. имеют на статью равные авторские права, за плагиат несет ответственность Озорнин С.П.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

- entsii studentov, magistrantov i aspirantov Zabaikal'skogo gosudarstvennogo universiteta "Molodezhnaya nauchnaya vesna v ZabGU-2014"* [Proceedings of XLI Practical Conference of Students, Master's Degree Students and Postgraduates of the Transbaikal State University "Youth Scientific Spring in ZabGU-2014"]. Chita: Transbaikal State University Publ., 2014, Part II, pp. 12–15. (In Russian).
7. Voznesenskii A.N., Ustimenko V.S., Balin N.M. *Sposob kontrolya pokazatelei nadezhnosti transportnogo sredstva* [The method to monitor vehicle reliability indicators]. Patent RF, no. 2129711, 1999
 8. Ozornin S.P. *Sovremennaya paradigma ekspluatatsii transportno-tekhnologicheskikh mashin* [Modern paradigm of transport-technological machines operation]. Chita: Transbaikal State University Publ., 2017, 195 p. (In Russian).
 9. Al'gin V.B. *Sistema osnovnykh raschetnykh zadach pri proektirovanii avtomobilya* [System of basic calculation tasks when designing a vehicle]. *Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Nauka – innovatsionnomu razvitiyu obshchestva"* [Materials of the International Scientific and Practical Conference "Science – to the innovative development of society"]. Minsk: Belarusian Science Publ., 2009, pp. 188–207.
 10. Mirgorodskii M.A., Vitvitskii E.E. Methodology for choosing the rolling stock for small shipments of goods in cities. *Avtotransportnoe predpriyatie* [Motor Transport Enterprise]. 2009, no. 6, pp. 45–48. (In Russian).

Authorship criteria

Ozornin S.P., Tarasov I.A. have equal author's rights. Ozornin S.P. bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interest

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.423.1

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-3-244-254>

МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ ВЫПРЯМИТЕЛЬНО-ИНВЕРТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА ПРИ ПРОПУСКЕ УПРАВЛЯЮЩИХ ИМПУЛЬСОВ

© Р.И. Устинов¹, О.В. Мельниченко²

Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Повышение работоспособности электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при пропусках импульсов управления с поддержанием процесса инвертирования и сохранением тормозной силы электровоза. **МЕТОДЫ.** Математическое моделирование, численные методы решения интегральных и дифференциальных уравнений, теория преобразовательных устройств. Эксперименты проводились на математической модели «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» в среде MatLab Simulink. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Произведен анализ электромагнитных процессов в силовых цепях электровоза при пропусках импульсов управления на тиристоры одного из плеч выпрямительно-инверторного преобразователя. В ходе математического моделирования электромагнитных процессов инвертора электровоза в режиме рекуперативного торможения при пропусках импульсов управления были получены кривые токов генераторов и напряжения инвертора. **ВЫВОДЫ.** В результате анализа кривых токов генераторов и напряжения инвертора предложено техническое решение, повышающее работоспособность электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения, реализуемое за счет изменения программного обеспечения микропроцессорной системы управления электровоза, которое позволяет поддержать процесс инвертирования и сохранить тормозную силу электровоза.

Ключевые слова: электровоз, электромагнитные процессы, выпрямительно-инверторный преобразователь, пропуск импульса, инвертор, аварийный режим, тиристорное плечо.

Информация о статье. Дата поступления 26 декабря 2018 г.; дата принятия к печати 19 марта 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 марта 2018 г.

Формат цитирования. Устинов. Р.И., Мельниченко О.В. Моделирование аварийных процессов выпрямительно-инверторных преобразователей электровоза при пропуске управляющих импульсов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 3. С. 244–254. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-244-254

MODELING EMERGENCY PROCESSES OF ELECTRIC LOCOMOTIVE REVERSIBLE CONVERTERS UNDER CONTROL PULSE SKIP

O.V. Melnichenko, R.I. Ustinov

Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is to improve the efficiency of AC electric locomotive in the regenerative braking mode under control pulse skip supporting the inversion process and retaining the electric locomotive braking force. **METHODS.** The study uses the following methods: mathematical modeling, numerical methods for solving integral and differential equations, the theory of transforming devices. The experiments were carried out using a mathematical model “traction substation – catenary network – electric locomotive” in MatLab Simulink environment. **RESULTS.** Electromagnetic processes has been analyzed in electric locomotive power circuits under control pulse skips to the thyristors of one

¹Устинов Роман Иванович, аспирант, учебный мастер кафедры «Электроподвижной состав», e-mail: romust93@mail.ru

Roman I. Ustinov, Postgraduate, Training Master of the Department of Electric Rolling Stock, e-mail: romust93@mail.ru

²Мельниченко Олег Валерьевич, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроподвижной состав», e-mail: olegmelnval@mail.ru

Oleg V. Melnichenko, Doctor of technical sciences, Associate Professor, Head of the Department of Electric Rolling Stock, e-mail: olegmelnval@mail.ru



of the shoulders of the reversible converter. The curves of generator currents and inverter voltages have been obtained in the course of mathematical modeling of the electromagnetic processes of the electric locomotive inverter in the mode of regenerative braking under control pulse skips. **CONCLUSIONS.** Having analyzed the curves of generator currents and inverter voltage we have proposed a technical solution that enables to improve the efficiency of AC electric locomotive in the regenerative braking mode that is implemented through changing the software of the microprocessor control system of an electric locomotive. The developed solution allows to support the inversion process and retain locomotive braking force.

Keywords: *electric locomotive, electromagnetic processes, reversible converter, pulse skip, inverter, emergency mode, thyristor shoulder*

Information about the article. Received December 26, 2018; accepted for publication March 19, 2018; available online March 31, 2018.

For citation. Melnichenko O.V., Ustinov R.I. Modeling emergency processes of electric locomotive reversible converters under control pulse skip. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 3, pp. 244–254. (In Russian). DOI: 10.21285/1814-3520-2018-3-244-254

Введение

История развития отечественных электровозов переменного тока начинается с электровоза ОР-22, построенного на московском заводе «Динамо» в 1938 году. На этом электровозе в качестве главного тягового преобразователя применялся многоанодный ртутный выпрямитель типа РВ-20Э, специально адаптированный для установки на электроподвижной состав, ранее применяемый на тяговых подстанциях. Регулирование выпрямленного напряжения ртутным преобразователем осуществлялось за счет изменения угла сдвига потенциала его сеток управления относительно анода и было плавным [1–3]. Применение рекуперативного торможения на «первенце» на тот момент являлось невозможным из-за нестабильной работы и низкой надежности преобразователя. Освоение рекуперативного торможения на электровозах с ионными преобразователями велось учеными: Б.Н. Тихменевым, Л.М. Трахтманом, А.Л. Лозановским, А.С. Капаневым, Б.М. Наумовым, Б.А. Тушкановым, В.А. Кучумовым, С.В. Власьевским и другими. Первым советским электровозом переменного тока с рекуперативным торможением стал ВЛ61-012, спроектированный на Новочеркасском электровазостроительном заводе (НЭВЗ) в марте 1957 года. На электровозе в качестве главного тягового преобразователя применялись одноанодные ртутные управляемые вентили – игнитроны типа ИВС-200/5, соединенные по схеме с

нулевым выводом, питание обмоток возбуждения тяговых электродвигателей производилось от ближайшей к нулевому выводу ступени тягового трансформатора через селеновый выпрямитель. На электровозе применялись различные системы автоматического управления торможением, разработанные Всероссийским научно-исследовательским институтом железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ) и Всероссийским научно-исследовательским институтом электромеханики (ВНИИЭМ) [2]. Тем не менее, электровозы с игнитронными преобразователями имели низкую надежность, при их обслуживании и эксплуатации возникали значительные трудности.

С появлением кремниевых силовых полууправляемых приборов (СПП) – диодов, началась их интенсивная интеграция в различные области науки и техники. Это было вызвано значительными преимуществами, связанными с простотой применения и высокой надежностью по сравнению с игнитронами, что на железнодорожном транспорте являлось одним из ключевых критериев, предъявляемых к элементной базе СПП. Первым отечественным электровозом переменного тока с выпрямительной установкой на базе кремниевых диодов стал ВЛ60К-001, выпущенный НЭВЗ в конце 1962 года [2]. Главным тяговым преобразователем электровоза была выпрямительная установка типа ВУК на силовых диодах ВК2-200 4-го класса. Регулиро-



вание напряжения осуществлялось по принципу переключения секций вторичной обмотки тягового трансформатора и было ступенчатым. Использовалось реостатное электрическое торможение, поскольку применение рекуперативного торможения с диодными выпрямительными установками было невозможным. Электровозы более поздней серии, работающие по принципиально схожей силовой схеме ВЛ80С, выпускались вплоть до 1995 года.

Следующим шагом в развитии отечественного электровозостроения переменного тока стал выпуск в 1968 году электровоза серии ВЛ80Р-300. В качестве главного тягового преобразователя на электровозе был установлен выпрямительно-инверторный преобразователь (ВИП) типа ВИП-1760 на новой элементной базе – тиристорах типа ТЛ-200 7-го класса [2]. Применение тиристорных преобразователей позволило вернуться к плавному регулированию напряжения и осуществлять рекуперативное торможение. Плавное зонно-фазовое регулирование обеспечивалось за счет изменения угла подачи управляющего импульса на тиристоры преобразователя^{4,5}. Использование принципа зонно-фазового регулирования напряжения на тот момент времени являлось большим шагом в развитии электровозостроения в России. Если рассматривать современные отечественные электровозы переменного тока с коллекторным тяговым приводом серии «Ермак», выпускающимся НЭВЗ с 2004 года, то принцип и алгоритмы управления ВИП остаются такими же, как и на первых электровозах серии ВЛ80Р [2]. Несмотря на богатый опыт применения рекуперативного торможения на электровозах переменного тока (более пятидесяти лет), этот режим по-прежнему

является наиболее сложным и уязвимым по сравнению с режимом тяги, отличающимся низкой надежностью, что зачастую приводит к возникновению аварийных процессов в инверторе электровоза.

Анализ характера, причин повреждения и режимов работы электрооборудования электровозов при выходе из строя тиристорных ВИП показал, что основная часть повреждений и сбоев в работе силовой части электровозов происходит из-за повреждения электронных элементов и отказов цепей системы управления. Большая часть таких отказов приводит к пропуску импульсов управления на тиристорные плечи ВИП [4, 5]. Например, достаточно одному из тиристорных плеч инвертора не принять нагрузку, чтобы процесс инвертирования тока был сорван: возникает аварийное нарастание тока, что приводит к срабатыванию аппаратов защиты в цепи инвертора, которые отключают своими блокировками электровоз от контактной сети, процесс инвертирования прекращается, тормозная сила электровоза при этом исчезает [6]. В этой ситуации возникает необходимость перехода на пневматическое торможение, что вызывает продольные динамические реакции по всей длине поезда со всеми вытекающими из этого последствиями. Благодаря применению на электровозах современных серий «Ермак» и ЭП1М/П микропроцессорной системы управления⁴ многие задачи по повышению работоспособности и надежности работы электровоза в режиме рекуперативного торможения могут быть решены с помощью доработки программного обеспечения без установки дополнительного оборудования в кузов электровоза.

⁴Руководство по эксплуатации. Электровоз магистральный 2ЭС5К (3ЭС5К) Ермак. ИДМБ.661142.009РЭ. В 8 кн. Новочеркасск: Изд-во НЭВЗ, 2004. 1357 с. / Operating manual. Mainline electric locomotive 2ES5K (3ES5K) Ermak. IDMB.661142.009RE. In 8 books. Novocherkassk: Novocherkassk electric locomotive building works Publ., 2004, 1357 p.

⁵Тихменев Б.Н., Трахтман Л.М. Подвижной состав электрических железных дорог. Теория работы электрооборудования, электрические схемы и аппараты: учебник для вузов ж/д транспорта. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1969. 408 с. / Tikhmenev B. N., Trakhtman L.M. Electric rolling stock of railways. Theory of electrical equipment operation, electrical circuits and devices: Textbook for railway universities. 3d edition revised and enlarged. Moscow: Transport Publ., 1969, 408 p.



В связи с изложенным выше в настоящем исследовании поставлены следующие задачи:

– доработать математическую модель «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» в режиме рекуперативного торможения, выполненную в редакторе Simulink пакета Matlab для исследования влияния пропусков управляющих импульсов на тиристорные плечи преобразователя;

– проанализировать электромагнитные процессы в инверторе электровоза, возникающие при пропуске управляющих

импульсов, в целях повышения работоспособности и надежности электровоза в режиме рекуперативного торможения;

– разработать техническое решение, позволяющее защитить инвертор электровоза от развития короткого замыкания в его силовой цепи и сохранить режим рекуперативного торможения;

– смоделировать пропуск импульса управления на примере четвертой зоны регулирования в режиме рекуперативного торможения с применением разработанного решения.

Анализ электромагнитных процессов при аварийной работе инвертора электровоза

Анализ основан на применении теории электрических цепей, методов математического моделирования, численных методов решения интегральных и дифференциальных уравнений, теории преобразовательных устройств. Эксперименты проводились на математической модели «тяговая подстанция – контактная сеть – электровоз» в среде MatLab Simulink [7, 8].

В качестве объекта исследования выбран ВИП электровоза в режиме рекуперативного торможения, который позволяет осуществлять зонно-фазовое регулирование напряжения на коллекторах тяговых электрических машин электровоза. На первой зоне регулирования осуществляется

только фазовое регулирование напряжения благодаря изменению фазы подачи угла открытия тиристорных плеч VS3-VS6 в зависимости от полупериода источника (потребителя) электродвижущая сила (ЭДС), с использованием вторичной обмотки трансформатора 1-2 (рис. 1). Со 2-й по 4-ю зону осуществляется зонно-фазовое регулирование напряжения, к изменению фазы подачи угла открытия тиристорных добавляется переключение секции вторичных обмоток тягового трансформатора. Работа преобразователя в режиме рекуперативного торможения осуществляется по алгоритму, представленному в табл. 1.

Таблица 1

Алгоритм управления ВИП в инверторном режиме

Table 1

Control algorithm of reversible converter in an inverter mode

Зона регулирования / Control area	Направление ЭДС трансформатора / Direction of transformer's EMF	Алгоритм работы плеч инвертора / Operation algorithm of inverter's shoulders							
		VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
IV	→	–	β	α_p	–	–	–	β	–
	← – – –	β	–	–	α_p	–	–	–	β
III	→	–	–	–	β	α_p	–	β	–
	← – – –	–	–	β	–	–	α_p	–	β
II	→	–	β	α_p	–	β	–	–	–
	← – – –	β	–	–	α_p	–	β	–	–
I	→	–	–	–	α_p	α_p	–	–	–
	← – – –	–	–	α_p	–	–	α_p	–	–



Для проведения анализа электромагнитных процессов представлена схема замещения инвертора на примере 4-й зоны регулирования с типовым алгоритмом управления при пропуске импульса управления плеча VS2 (рис. 1). Также определяются контуры протекания тока, задаются направления его протекания в ветвях, находятся общие для контуров узлы и составляются уравнения согласно второму закону Кирхгофа. Представленные ниже уравнения описывают происходящие в определенный интервал времени электромагнитные процессы. При расчетах индуктивность цепи генерируемого тока заменяется эквивалентной индуктивностью, рассчитываемой по формуле:

$$L_{гэ} = \frac{1}{2} (L_{ср} + L_{я} + L_{дп} + L_{ко}), \quad (1)$$

где $L_{ср}$ – индуктивность сглаживающего реактора; $L_{я}$ – индуктивность обмотки якоря; $L_{дп}$ – индуктивность добавочных полюсов; $L_{ко}$ – индуктивность компенсационной обмотки.

Активное сопротивление цепи выпрямленного тока заменяется эквивалентным активным сопротивлением, которое рассчитывается по формуле

$$r_{гэ} = \frac{1}{2} (r_{ср} + r_{я} + r_{дп} + r_{ко} + r_{ббр}), \quad (2)$$

где $r_{ср}$ – активное сопротивление сглаживающего реактора; $r_{я}$ – активное сопротивление обмотки якоря; $r_{дп}$ – активное сопротивление добавочных полюсов; $r_{ко}$ – активное сопротивление компенсационной обмотки; $r_{ббр}$ – активное сопротивление блока балластных резисторов.

Для упрощенной записи падения напряжения на тиристорах плеча используется формула

$$\Delta U_{VSn} = \Delta U_{VS} \cdot N, \quad (3)$$

где ΔU_{VS} – падение напряжения на тиристоре плеча; n – номер плеча; N – количество последовательно включенных в ветви плеча элементов.

Падение напряжения в цепи выпрямленного тока определяется по формуле

$$\Delta U_g = i_g \cdot r_{гэ}, \quad (4)$$

где i_g – ток генератора; $r_{гэ}$ – эквивалентное активное сопротивление цепи генератора.

Индуктивность обмоток трансформатора обозначим как L_{k-m} , а ЭДС обмоток трансформатора – E_{k-m} , где k и m – номера выводов вторичной обмотки тягового трансформатора.

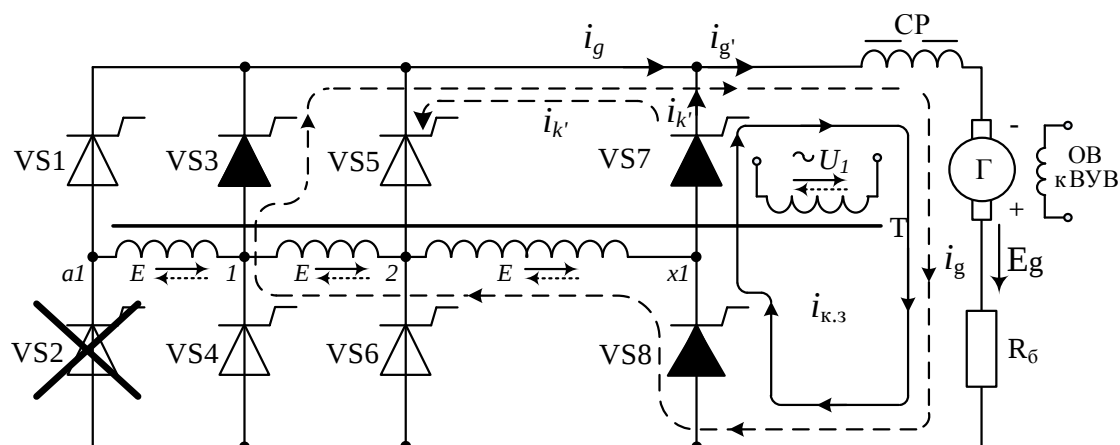


Рис. 1. Мгновенная схема замещения ВИП в режиме инвертора с типовым алгоритмом управления на 4-й зоне регулирования при пропуске импульса управления на плечо VS2

Fig. 1. Instantaneous equivalent circuit of a reversible converter in the inverter mode with a typical control algorithm on the 4-th control area at control pulse skip on the shoulder VS2



Для примера рассмотрим интервал времени коммутации при направлении ЭДС, указанной на рис 1, сплошной стрелкой. Рассмотрим два контура протекания тока генератора:

– первый контур (i_g): положительный вывод генератора Г, блок балластных резисторов R_6 , тиристорное плечо VS8, вторичная обмотка тягового трансформатора с выводами а1-х1, тиристорное плечо VS3, сглаживающий реактор СР, отрицательный вывод генератора Г;

– второй контур (i_k): вторичная обмотка тягового трансформатора с выводами 1-х1, тиристорные плечи VS7 и VS3.

Определим общий для этих контуров узел и зададимся направлением протекания тока в ветвях (i_g , i_k). Для интервала коммутации в малом контуре получим систему уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_g}{dt} = \frac{E_g - E_{1-x1} - \Delta U_g - \Delta U_{VS8} - \Delta U_{VS3}}{L_{1-x1} + L_{g3}}; \\ \frac{di_k}{dt} = \frac{E_{1-x1} + \Delta U_{VS7} - \Delta U_{VS3}}{L_{1-x1} + L_{g3}}; \\ i_g + i_k - i_{g'} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

После завершения коммутации с тиристорных плеча VS3 на тиристоры плеча VS7 в цепи инвертора образуется короткозамкнутый контур протекания тока: положительный вывод генератора Г, тиристорные

плечи VS8-VS7, сглаживающий реактор СР и отрицательный вывод генератора Г (на рис 1 показан сплошной линией). Ток генератора в этом контуре равен:

$$\frac{di_g}{dt} = \frac{E_g - \Delta U_g - \Delta U_{VS8} - \Delta U_{VS7}}{L_{g3}}. \quad (6)$$

Напряжение инвертора $U_{\text{и}}$ в этот момент равно нулю, так как ток генератора протекает через одновременно открытые плечи инвертора VS8-VS7, минуя вторичную обмотку тягового трансформатора. Из-за малого сопротивления выпрямленной цепи, которое обусловлено только индуктивным сопротивлением цепи L_{g3} , сила тока резко увеличивается [9, 10].

Для подтверждения результатов анализа электромагнитных процессов и их визуализации был смоделирован случай пропуска импульса управления на математической модели выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза в редакторе Simulink [7]. На рис. 2 показана блок-схема ВИП с добавленными блоками: блок управления, блок пропуска сигнала β – угла опережения открытия тиристорных плеч инвертора, блок коммутации – имитация датчиков угла коммутации для отслеживания длительности коммутации тиристорных плеч инвертора – γ .

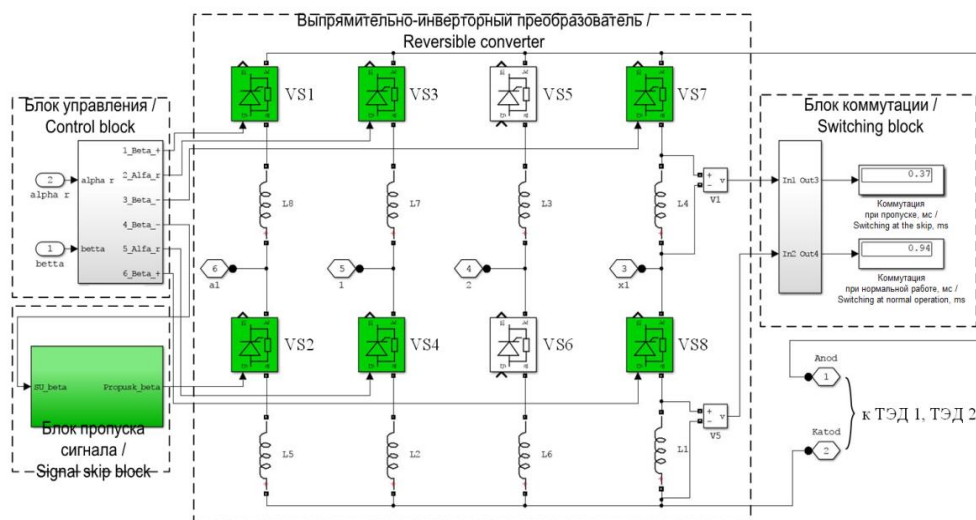


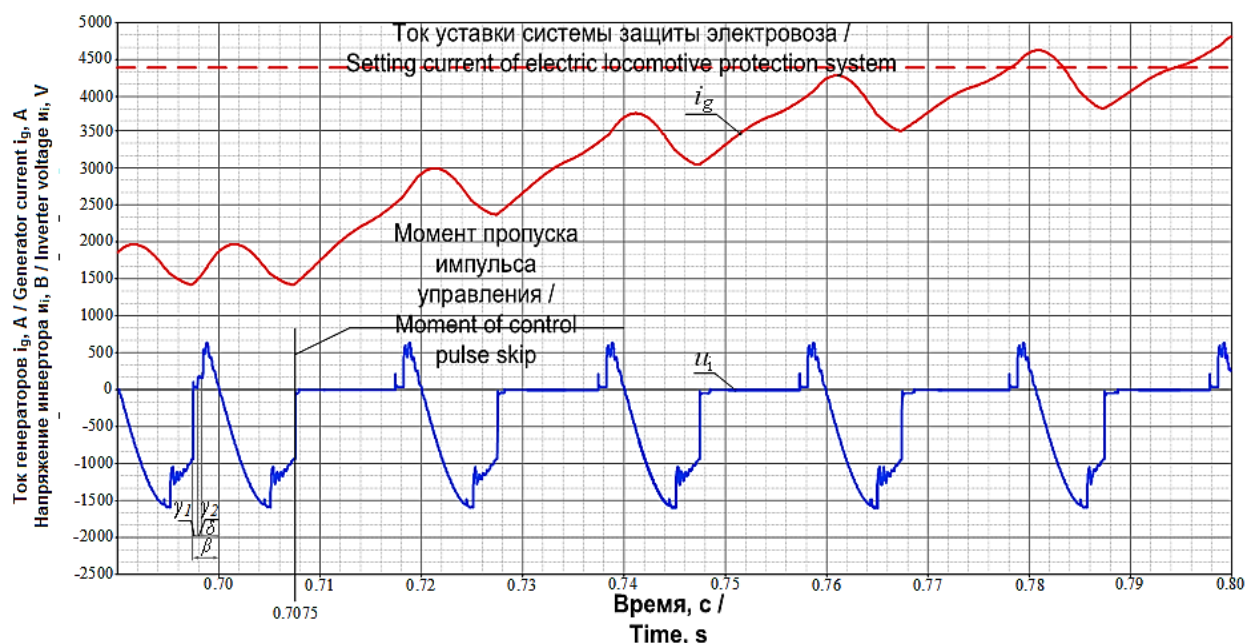
Рис. 2. Блок-схема ВИП в редакторе Simulink
Fig. 2. Block diagram of the reversible converter in Simulink



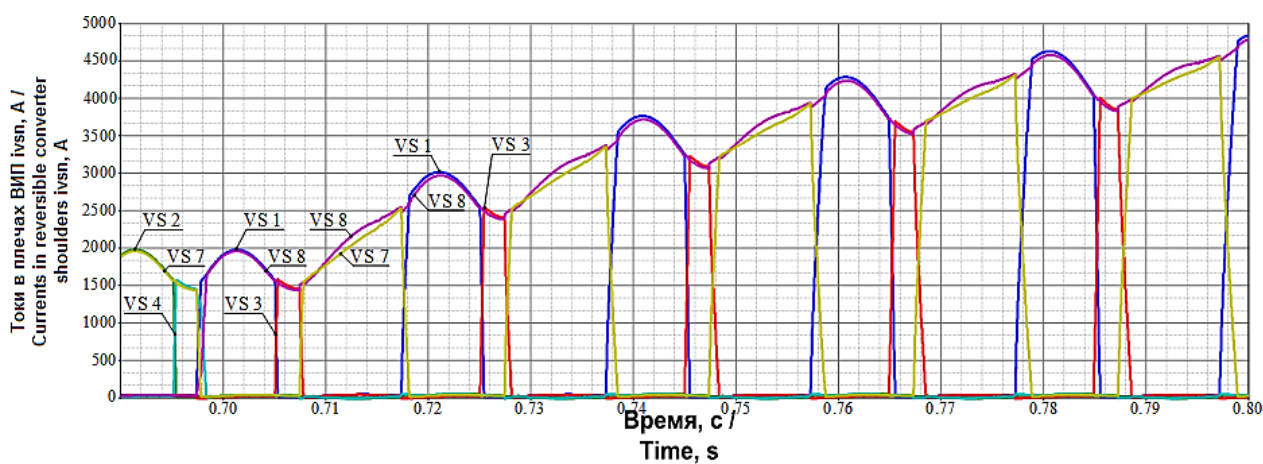
Результаты моделирования пропуска управляющего импульса плеча VS2 инвертора на 4-й зоне регулирования при типовом алгоритме управления

По результатам моделирования аварийных процессов инвертора электроваза при пропуске управляющего импульса

β на плечо VS2 были получены кривые токов и напряжений (рис. 3).



a



b

Рис. 3. Кривые токов и напряжения, характеризующие процесс инвертирования при пропуске управляющего импульса: а – ток генераторов и напряжение инвертора при аварийной работе на 4-й зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения; б – токи плеч ВИП при аварийной работе на 4-й зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения

Fig. 3. Curves of currents and voltages characterizing the process of inversion at control pulse skip: а – generator current and inverter voltage at emergency operation in the 4-th control area in a regeneration braking mode; б – currents of reversible converter shoulders at emergency operation in the 4-th control area in a regeneration braking mode



В ходе моделирования был произведен пропуск управляющего импульса β на тиристорное плечо VS2 в момент времени 0,7075 с. Это привело к образованию режима короткого замыкания, вследствие чего сила тока в цепи преобразователя за несколько полупериодов достигла величины более 5000 А (см. рис. 3). Такой ток приводит к срабатыванию аппаратов защиты электровоза и потере его тормозной силы. Машинист, ведя поезд по уклону, вынужден незамедлительно применить пневматическое торможение, в результате чего в поезде возникают значительные продольные реакции, которые создают дополнительную нагрузку на ударно-тяговые устройства локомотива и состава, что может привести к сходу подвижного состава с

рельсовой колеи.

Для защиты инвертора электровоза от развивающихся токов короткого замыкания авторами в качестве технического решения произведено резервирование аварийного плеча, не принявшего токовую нагрузку параллельным тиристорным плечом этого же преобразователя согласно алгоритму, представленному в табл. 2 [11]. Например, при пропуске импульса управления на тиристорное плечо VS2 при работе инвертора на 4-й зоне регулирования необходимо подавать вновь сформированные импульсы управления на тиристорные плечи VS4 и VS7. В этом случае ток рекуперации снизится до допустимой величины, и процесс инвертирования будет сохранен.

Таблица 2

Алгоритм управления тиристорными плечами инвертора в случае пропуска импульсов управления

Table 2

Control algorithm of inverter thyristor shoulders in case of control pulse skip

Зона регулирования / Control area	Аварийное плечо / Emergency shoulder	Направление ЭДС трансформатора / Direction of transformer's EMF	Алгоритм работы плеч ВИП / Operation algorithm of reversible converter shoulders							
			VS1	VS2	VS3	VS4	VS5	VS6	VS7	VS8
IV	VS1	→	—	—	β	—	—	—	—	β
		←	—	β	—	—	—	—	β	—
	VS2	→	β	—	—	—	—	—	—	β
		←	—	—	—	β	—	—	β	—
	VS7	→	β	—	—	—	—	—	—	β
		←	—	β	—	—	β	—	—	—
	VS8	→	β	—	—	—	—	β	—	—
		←	—	β	—	—	—	—	β	—
III	VS3	→	—	—	—	—	β	—	—	β
		←	—	—	—	β	—	—	β	—
	VS4	→	—	—	β	—	—	—	—	β
		←	—	—	—	—	—	β	β	—
	VS7	→	—	—	β	—	—	—	—	β
		←	—	β	—	—	β	—	—	—
	VS8	→	β	—	—	—	—	β	—	—
		←	—	β	—	—	—	—	β	—
II	VS1	→	—	—	—	—	β	—	—	β
		←	—	—	—	—	—	β	β	—
	VS2	→	—	—	—	—	β	—	—	β
		←	—	—	—	—	—	β	β	—
	VS5	→	—	—	β	—	—	β	—	—
		←	—	—	—	—	—	β	β	—
	VS6	→	—	—	—	β	β	—	—	—
		←	—	—	—	—	β	—	—	β



Для определения пропусков импульсов управления предлагается использовать штатные сигналы датчиков угла коммутации, которые формируют сигнал пропорциональный длительности коммутаций тиристорных плеч ВИП. В случае пропуска импульса на одно из тиристорных плеч инвертора будет отсутствовать и один из контуров коммутации, благодаря чему с необходимой и достаточной точностью можно определить пропуск импульса управления. На рис. 2 показан блок коммутации, который на дисплее численно выводит длительность коммутаций. В результате анализа этих сигналов установлено, что при нормальной работе преобразователя длительность коммутации составляет 0,97 мс,

а при пропуске импульса управления – 0,37 мс. Уменьшение длительности коммутации при пропуске импульса в 2,5 раза по сравнению с типовой работой свидетельствует о наличии пропуска импульса управления.

Согласно разработанному авторами алгоритму управления (см. табл. 2) необходимо в полупериод работы аварийного плеча подать импульсы управления β на тиристорные плечи VS7 и VS4, поддерживая тем самым напряжение инвертора электровоза и сохраняя ток в генераторах. По результатам моделирования разработанного способа при пропуске управляющего импульса β на плечо VS2 были получены кривые токов и напряжений, представленные на рис. 4.

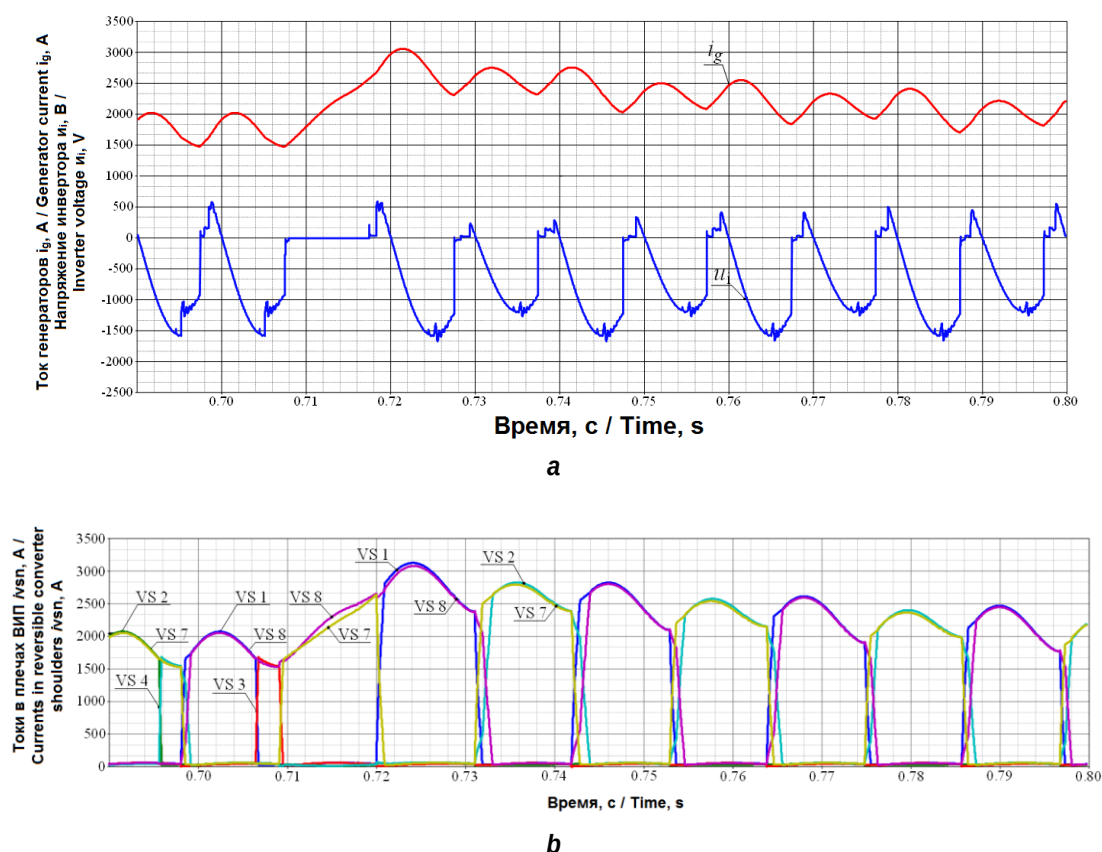


Рис. 4. Кривые токов и напряжения, характеризующие процесс инвертирования при работе согласно разработанному алгоритму исключающему развитие короткого замыкания:

а – ток генераторов и напряжение инвертора при аварийной работе на 4-й зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения; б – токи плеч ВИП при аварийной работе на 4-й зоне регулирования в режиме рекуперативного торможения

Fig. 4. Curves of currents and voltages characterizing the process of inversion under the operation according to the developed algorithm eliminates the development of short-circuit:

a – generator current and inverter voltage at emergency operation in the 4-th control area in a regeneration braking mode; b – currents of reversible converter shoulders at emergency operation in the 4-th control area in a regeneration braking mode



Из рис. 4 видно, что при работе согласно приведенному в табл. 2 алгоритму токи на генераторах с течением времени снижаются, что приводит к поддержанию процесса инвертирования и сохранению тормозной силы электровоза. Это означает,

что величины напряжения инвертора при его работе согласно данному алгоритму достаточно, чтобы снизить развитие токов короткого замыкания и поддержать ток рекуперации в допустимых пределах.

Выводы

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Пропуск управляющего импульса β при типовом алгоритме управления на тиристорное плечо инвертора электровоза вызывает интенсивное нарастание силы тока с каждым последующим полупериодом напряжения, что приводит к отключению инвертора аппаратами защиты электровоза, срыву режима рекуперативного

торможения, что в свою очередь снижает безопасность движения поездов.

2. Предложен способ повышения работоспособности электровоза переменного тока при пропуске управляющих импульсов, который позволяет сохранить режим рекуперативного торможения путем усовершенствования алгоритма управления преобразователями электровоза, при этом установки дополнительного оборудования в кузов электровоза не требует.

Библиографический список

1. Лившиц Б.Г. Электровоз однофазно-постоянного тока с ртутным преобразователем // Электричество. 1937. № 19. С. 16–24.
2. Раков В.А. Локомотивы отечественных железных дорог 1956–1975. М.: Транспорт, 1999. 443 с.
3. Тихменев Б.Н., Чекмарев Н.О. Опытный электровоз однофазного тока 50 Hz // Электричество. 1939. № 6. С. 43–45.
4. Мельниченко О.В. Обеспечение работоспособности электровоза в режиме тяги при аварийных режимах выпрямительно-инверторного преобразователя: монография. Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2014. 169 с.
5. Мельниченко О.В., Власьевский С.В. Аварийные процессы на первой зоне регулирования напряжения преобразователя электровоза переменного тока и обеспечение его работоспособности // Электрификация транспорта. 2013. № 6. С. 101–112.
6. Пименов В.П., Поссе А.В. Опрокидывание инвертора // Электричество. 1957. № 7. С. 65–70.
7. Мельниченко О.В., Линьков О.А., Портной А.Ю., Шрамко С.Г. Математическое моделирование работы электровоза с новой выпрямительной установкой возбуждения на IGBT транзисторах // Наука и техника транспорта. 2013. № 2. С. 21–28.
8. Мельниченко О.В. Математическое моделирова-

- ние выпрямительно-инверторного преобразователя электровоза в аварийных режимах с типовым и предлагаемым способами управления // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2013. № 4 (40). С. 229–233.
9. Устинов Р.И., Мельниченко О.В., Линьков А.О., Газизов Ю.В. Повышение работоспособности ВИП электровоза переменного тока в режиме рекуперативного торможения при пропуске импульсов управления // Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы VII Междунар. науч.-практ. конф. (Иркутск, 25 мая 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2016. С. 517–520.
 10. Устинов Р.И., Мельниченко О.В. Разработка нового алгоритма управления ВИП в случае пропуска импульсов управления в режиме рекуперативного торможения. Наука и молодежь: сб. тр. II Всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых (Иркутск, 29 марта – 01 апреля 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2016. С. 256–259.
 11. Устинов Р.И., Мельниченко О.В. Способ повышения работоспособности ВИП электровоза переменного тока при пропуске импульсов управления в режиме рекуперативного торможения // Вестник Института тяги и подвижного состава. 2016. № 12. С. 64–67.

References

1. Livshits B.G. Electric locomotive of a single-phase DC with a mercury converter. *Elektrichestvo*. [Electricity]. 1937, no. 19, pp. 16–24. (In Russian).
2. Rakov V.A. *Lokomotivy otechestvennykh zheleznikh dorog 1956–1975* [Locomotives of the domestic railways of 1956–1975]. Moscow: Transport Publ., 1999,

- 443 p. (In Russian).
3. Tikhmenev B.N., Chekmarev N.O. Experimental electric locomotive of 50 Hz single-phase current. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1939, no. 6, pp. 43–45. (In Russian).
 4. Mel'nichenko O.V. *Obespechenie rabotosposobnosti elektrovoza v rezhime tyagi pri avariinykh rezhimakh*



vypryamitel'no-invertornogo preobrazovatelya [Provision of locomotive operability in the traction mode under reversible converter emergency modes]. Irkutsk: Irkutsk state Transport university Publ., 2014, 169 p. (In Russian).

5. Mel'nichenko O.V., Vlas'evskii S.V. Emergency first process control area voltage converter AC locomotives and support the operation. *Elektrifikatsiya transporta* [Electrification of transport]. 2013, no. 6, pp. 101–112. (In Russian).

6. Pimenov V.P., Posse A.V. Inverter triggering. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1957, no. 7, pp. 65–70. (In Russian).

7. Mel'nichenko O.V., Lin'kov O.A., Portnoi A.Yu. Shramko S.G. Mathematical modeling of the operation of an electric locomotive with the new rectifying installation of excitation on IGBT transistors. *Nauka i tekhnika transporta* [Science and Technology in Transport]. 2013, no. 2, pp. 21–28. (In Russian).

8. Mel'nichenko O.V. Mathematical modeling of electric locomotive rectifier-inverter converter in emergency mode with standard and suggested methods of controlling. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2013, no. 4 (40), pp. 229–233. (In Russian).

9. Ustinov R.I., Mel'nichenko O.V. Lin'kov A.O., Gazizov Yu.V. *Povyshenie rabotosposobnosti VIP elektrovoza peremennogo toka v rezhime rekupera-*

ativnogo tormozheniya pri propuske impul'sov upravleniya [Improving efficiency of AC locomotive reversible converter in the regenerative braking mode under control pulse skip]. *Materialy Sed'moi mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona"* [Proceedings of VII International Scientific and Practical Conference "Transport Infrastructure of the Siberian Region"]. Irkutsk: Irkutsk state Transport University Publ., 2016, pp. 517–520. (In Russian).

10. Ustinov R.I., Mel'nichenko O.V. Razrabotka novogo algoritma upravleniya VIP v sluchae propuska impul'sov upravleniya v rezhime rekuperativnogo tormozheniya [Development of a new algorithm to control a reversible converter in the case of control pulse skip in the regenerative braking mode]. *Sbornik trudov II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh "Nauka i molodezh"* [Collection of articles of II All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists]. Irkutsk: Irkutsk state Transport University Publ., 2016, pp. 256–259. (In Russian).

11. Ustinov R.I., Mel'nichenko O.V. Method to improve the efficiency of AC electric locomotive reversible converter under control pulse skip in regenerative braking mode. *Vestnik Instituta tyagi i podvizhnogo sostava* [Bulletin of the Institute of Traction and Rolling Stock]. 2016, no. 12, pp. 64–67. (In Russian).

Критерии авторства

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

The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

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 международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлены 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-119.

Телефон: **(3952) 40-59-27** – Сокольников Татьяна Васильевна, ответственный за выпуск,
(3952) 40-58-57.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: vestnik@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 3 (134) 2018

Редактор О.А. Терновская
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Т.В. Сокольников
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка А.В. Куртовой

Выход в свет 21.03.2018 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 32,5.
Тираж 500 экз. Заказ 113. Поз. плана 3н.

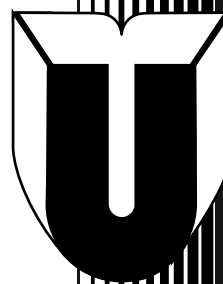
Издание распространяется **бесплатно**

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, 2018

