

Том 22, № 7

2018

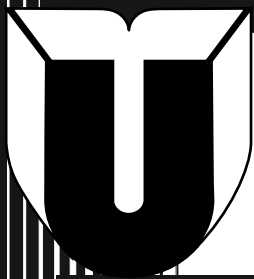
ISSN 1814-3520 (print)
ISSN 2500-1590 (online)

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, № 7

2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 22, № 7

2018

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Редакционная коллегия

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

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

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)

СУСЛОВ К.В., кандидат технических наук, профессор Иркутского национального исследовательского технического университета (г. Иркутск, Россия)

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, учредителя и издателя:
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.
e-mail: pgr@istu.edu

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 7

2018

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

Editorial board

KORNIKOV M.V., Dr. Sc. in Engineering, Rector
Rector 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)

BOROVNIKOV 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)

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

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)

SCHOLTES BERTHOLT, 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 editorial Board, founder and publisher:
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074
e-mail: pgp@istu.edu

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- ❁ Астафьева Н.А., Бузин А.С. Исследование влияния видов предварительной обработки на качество сварных облегченных конструкций из алюминиевых сплавов..... 10
- ❁ Лагунова Е.О. Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, в турбулентном режиме трения с учетом зависимости вязкости от давления и температуры..... 19
- ❁ Серга Г.В., Марченко А.Ю., Хвостик Э.А. Увеличение технологических возможностей и повышение эффективности вибрационной обработки деталей в машиностроительном производстве..... 33
- ❁ Штайгер М.Г., Балановский А.Е. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (обзор). Часть 2..... 41

Информатика, вычислительная техника и управление

- ❁ Зуенко А.А. Методы ускорения комбинаторного поиска на основе матричного представления качественных зависимостей в задачах удовлетворения ограничений..... 69
- ❁ Столяров А.И., Донецкая Ю.В., Гатчин Ю.А. Особенности САПР при проектировании комплекса..... 88
- ❁ Черных Ю.А., Витвицкий Д.С., Кузьмина О.И. Алгоритм расчета интегрального индекса эффективности публикационной активности профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников вуза..... 96

Энергетика

- ❁ Губий Е.В. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов биомассой с энергетических плантаций..... 102
- ❁ Курнакова Н.Ю., Нуждин А.В., Волхонский А.А. О Возможности повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с применением теплового насоса..... 114
- ❁ Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю., Сизганов Н.В., Филатов АН. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электроснабжения..... 123

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- Полозов П.Ю., Поршнева Е.Г. Модернизация системы зажигания автономного электроагрегата АЭ-1 с помощью молекулярного накопителя энергии..... 147
- Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Оценка ресурсов угля восточных регионов России для строительства угольных электростанций..... 155



Металлургия и материаловедение



- Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. Разработка научных и технологических основ плазмохимического производства карбида циркония..... 164
- Дошлов О.И., Чижик К.И., Дошлов И.О., Подгорбунская Т.А., Афанасьева Р.С. Современная ресурсосберегающая технология получения анодной массы в металлургическом производстве..... 181



Транспорт



- Бояршинов А.Л., Ишков А.М., Решетников А.П. Влияние магнитных бурь на безопасность дорожного движения в условиях Севера..... 193
- Бутузова А.Б., Елфимова Н.А. Школьные перевозки в России и за рубежом..... 200
- Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Методика вычислительного эксперимента на основе ANSYS по определению аэродинамических характеристик тела при отрывном обтекании..... 208
- Михеев В.А. Влияние инновационных вагонов на производительность подвижного состава в грузовом движении..... 223
- Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Лысенко А.В., Кузнецов Н.Ю. Контроль технического состояния амортизаторов автотранспортного средства при переезде единичной неровности..... 234



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 7

2018

CONTENTS



Mechanical Engineering and Machine Science

- | | |
|---|---|
| <p>☒ Astafieva N.A., Buzin A.S. Study of primary machining type influence on the quality of welded lightweight aluminum alloy structures.....</p> <p>☒ Lagunova E.O. Calculated model of the radial bearing lubricated by the melt in the turbulent friction mode taking into account viscosity dependence on pressure and temperature.....</p> <p>☒ Serga G.V., Marchenko A.Yu., Khvostik E.A. Increasing technological capabilities and improving efficiency of part vibration treatment in machinery production.....</p> <p>☒ Shtaiger M.G., Balanovsky A.E. Analysis of welding technologies of high-strength rails in terms of structure formation under construction and reconstruction of high speed railroads (review). Part 2.....</p> | <p>10</p> <p>19</p> <p>33</p> <p>41</p> |
|---|---|



Information Science, Computer Engineering and Management

- | | |
|--|-------------------------------|
| <p>☒ Zuenko A.A. Methods for accelerating combinatorial search based on matrix representation of qualitative relationships in constraint satisfaction problems.....</p> <p>☒ Stolyarov A.I., Donetskaya Yu.V., Gatchin Yu.A. CAD features in the design of a complex.....</p> <p>☒ Chernykh Y.A., Vitvitsky D.S., Kuzmina O.I. Algorithm to calculate integrated efficiency index of university academic staff and researcher publication activity.....</p> | <p>69</p> <p>88</p> <p>96</p> |
|--|-------------------------------|



Power Engineering

- | | |
|--|----------------------------------|
| <p>☒ Gubiy E.V. Mathematical model to analyze reliability of remote settlement fuel supply with biomass from energy plantations.....</p> <p>☒ Kurnakova N.Yu., Nuzhdin A.V., Volkhonsky A.A. On the possibility to improve the energy efficiency of the CHP heat balance diagram using a heat pump.....</p> <p>☒ Petukhov R.A., Sizganova E.Yu., Sizganov N.V., Filatov A.N. To the problem of automated control of reactive power flows in electrical energy supply systems.....</p> | <p>102</p> <p>114</p> <p>123</p> |
|--|----------------------------------|

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

CONTENTS



Power Engineering



-  **Polozov P.Yu., Porshneva E.G.** Modernization of standby electric generating unit ignition system by means of molecular energy storage..... 147
-  **Sokolov A.D., Takaishvili L.N.** Evaluation of coal resources in eastern regions of Russia for construction of coal power stations..... 155



Metallurgy and Materials Science



-  **Alekseeva T.I., Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G.** Development of scientific and technological bases of plasma-chemical production of zirconium carbide..... 164
-  **Doshlov O.I., Chizhik K.I., Doshlov I.O., Podgorbunskaya T.A., Afanasieva R.S.** Modern resource-saving technology to produce anode mass in metallurgical industry..... 181

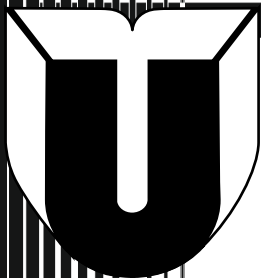


Transport



-  **Boyarshinov A.L., Ishkov A.M., Reshetnikov A.P.** Magnetic storm effect on traffic safety in the conditions of North..... 193
-  **Butuzova A.B., Elfimova N.A.** School transportation in Russia and abroad..... 200
-  **Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Krivel S.M.** ANSYS-based methodology of the computational experiment on body aerodynamic characteristics determination at detached flow..... 208
-  **Mikheev V.A.** Innovation car influence on rolling stock performance in freight trains..... 223
-  **Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Lysenko A.V., Kuznetsov N.Yu.** Control of technical condition of vehicle shock absorbers when crossing a single hump..... 234





ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Уважаемые читатели!

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

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

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

«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.

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

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

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

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

Editorial Board





Оригинальная статья / Original article

УДК 621.791.015

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-10-18>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ВИДОВ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО СВАРНЫХ ОБЛЕГЧЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© Н.А. Астафьева¹, А.С. Бузин²

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

РЕЗЮМЕ. В статье приведены результаты исследования сварных соединений из алюминиевого сплава системы Al-Fe-Si. Сварка проводилась с целью получения деталей, используемых для авиационного назначения. Сложность осуществления соединения облегченных деталей типа «обшивки» связана с частыми появлениями дефектов, а именно: отклонением от плоскостности, изменением геометрии поверхности соединений после контактной точечной сварки. Так как регулированием параметров режима и условий сварки не смогли добиться положительного результата, было принято решение проверить влияние предшествующих операций технологического процесса. **ЦЕЛЬЮ** данной работы являлось исследование влияния видов предварительной обработки тонколистовых деталей из алюминиевых сплавов на качество сварных соединений, полученных контактной точечной сваркой. **МЕТОДЫ.** Экспериментально определено влияние способа получения заготовок и направления проката листа образцов при раскросе на качество сварных соединений. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Наилучшие результаты после сварки получены на деталях, выполненных методом химического размерного травления. После контактной сварки таких образцов с окнами обнижения 0,9 мм и 1,1 мм, вне зависимости от направления раскроса листа, дефекты не обнаружены. После контактной сварки на деталях с окнами обнижения 0,68–0,75; 0,88–0,96 мм, выполненными методом механической обработки, вне зависимости от направления раскроса листа, выявлены дефекты в виде так называемых хлопнунов. На деталях с увеличенной толщиной 1,15 мм отклонения поверхности от плоскостности после сварки не наблюдаются. **ВЫВОДЫ.** Установлено, что появление после контактной точечной сварки на образцах дефектов целостности геометрии не зависит от направления раскроса листов, а зависит от вида обработки и толщины получаемых окон обнижения. Снизить остаточные деформации после механической обработки можно путем уменьшения глубины утонения, т.е. увеличив толщину деталей в окнах обнижения до максимально допустимой – 1,15 мм. Это исключает вероятность появления дефектов после сварки в виде выпуклостей поверхности.

Ключевые слова: контактная сварка, алюминиевый сплав, дефекты точечной сварки, химическое травление, фрезерование.

Информация о статье. Дата поступления 04 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 11 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Астафьева Н.А., Бузин А.С. Исследование влияния видов предварительной обработки на качество сварных облегченных конструкций из алюминиевых сплавов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 10–18. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-10-18

STUDY OF PRIMARY MACHINING TYPE INFLUENCE ON THE QUALITY OF WELDED LIGHTWEIGHT ALUMINUM ALLOY STRUCTURES

N.A. Astafieva, A.S. Buzin

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

¹Астафьева Наталья Анатольевна, кандидат технических наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, e-mail: anstella@mail.ru

Natalia A. Astafieva, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Engineering Technologies and Materials, e-mail: anstella@mail.ru

²Бузин Анатолий Сергеевич, магистрант, e-mail: buzin.as@mail.ru

Anatoly S. Buzin, Master's Degree Student, e-mail: buzin.as@mail.ru



ABSTRACT. The article presents the study results of welded joints from the aluminum alloy of Al-Fe-Si system. The purpose of welding is to obtain aircraft parts. The challenge of joining light-weight skin-type parts consists in frequent defects such as flatness deviations and joint surface geometry changes caused by spot resistance welding. As the adjustment of welding mode and conditions has not yielded favorable results a decision was made to study the influence of previous operations of the technological process. The **PURPOSE** of this work is to study the influence of the types of primary machining of aluminum alloy sheet parts on the quality of welded joints obtained by spot resistance welding. **METHODS.** The influence of the blank production method and sample sheet rolling direction at nesting on the quality of welded joints has been determined experimentally. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The best results after welding have been obtained on the parts made by chemical dimensional etching. After resistance welding of such samples with the thinning windows of 0.9 mm and 1.1 mm regardless of the sheet nesting direction the defects were not found. After resistance welding on parts with the thinning windows of 0.68 - 0.75 mm, 0.88-0.96 performed by the mechanical processing method regardless of the sheet nesting direction the defects in the form of bucklings were identified. The parts with the increased thickness of 1.15 mm do not feature any surface deviations from flatness after welding. **CONCLUSIONS.** It has been determined that the appearance of geometry integrity defects after spot resistance welding on samples does not depend on the direction of sheet nesting but depends on the type of machining and the thickness of thinning windows. The residual deformation after machining can be reduced by decreasing the depth of thinning, i.e. increasing the part thickness in the thinning windows to the maximum allowable value of 1.15 mm. This eliminates the possibility of defects after welding in the form of surface crowns.

Keywords: resistance welding, aluminum alloy, spot welding defects, chemical etching, milling

Information about the article. Received April 04, 2018; accepted for publication June 11, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Astafeva N.A., Buzin A.S. Study of primary machining type influence on the quality of welded lightweight aluminum alloy structures. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 10–18. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-10-18 (In Russian).

Введение

Контактная сварка широко применяется в самолетостроении и других отраслях промышленности. В элементах конструкций самолетов может присутствовать более миллиона сварных точечных соединений. Контактная точечная сварка – сложный процесс образования неразъемных соединений, формирование которых происходит при определенных условиях нагрева и давления. Качество сварных конструкций из алюминиевых сплавов определяется совокупностью эксплуатационных и технологических характеристик соединения, сохраняющихся в процессе эксплуатации изделия. Поэтому вопросы повышения качества сварных соединений и совершенствование процесса контактной точечной сварки являются особо актуальными. На качество получаемых соединений из алюминиевых сплавов влияют различные факторы, например, такие как параметры термомеханических процессов [1–3]. Они протекают в зоне формирования соединения и зависят от особенностей технологии, параметров режима и условий сварки, выбранной циклограммы процесса и др. [4]. Этим

вопросам посвящено множество исследований [5–13]. Но существуют и другие, малоизученные причины нестабильности процесса получения тонкостенных конструкций из рассматриваемых сплавов.

При изготовлении заготовок из алюминиевых сплавов авиационного назначения задачи по снижению веса за счет уменьшения толщины деталей до недавнего времени решали традиционным методом – размерным химическим травлением (РХТ). Процесс классического РХТ был внедрен для обработки различных деталей авиационного назначения и успешно применялся длительное время. Однако в связи с современными требованиями по экологической безопасности этот метод стал нежелателен, так как в процессе травления используются кислоты в больших объемах.

Внедрение нового оборудования позволило перейти на альтернативную экологически чистую технологию механической обработки панелей, обшивок и других деталей. В настоящее время широко применяются специальные многокоординатные обрабатывающие комплексы, отлича-



ющиеся использованием различных способов закрепления тонкостенных листовых заготовок. При этом цикл изготовления сокращается, так как после обтяжки изделие размещается сразу на станке, выполняется фрезерование, затем – слесарные работы и далее по технологическому циклу. Например, метод механической обработки для изготовления обшивок взамен химического фрезерования заложен в конструкторской документации МС-21.

Механическая обработка деталей имеет свои преимущества:

- отсутствует разрыхленная поверхность (в отличие от химического травления);
- обеспечивается стабильная толщина детали;
- повышается производительность процесса получения заготовок и др.

Однако при полном цикле изготовления детали возникают сложности с последующими операциями. В частности, после контактной сварки тонколистовых изделий из алюминиевых сплавов в последнее время участились случаи возникновения дефектов в виде выпуклости поверхностей, так называемых хлопунгов. Их можно представить как отклонение от плоскостности, характеризующееся двойной кривизной, т.е. пластической деформацией листа в двух взаимно перпендикулярных направлениях – по длине и ширине. Такое нарушение геометрии является недопустимым дефектом при сварке.

Целью данной работы является исследование влияния предварительной обработки тонколистовых деталей из алюминиевых сплавов на качество сварных соединений, полученных контактной точечной сваркой.

Материалы и методы исследований

Для исследований влияния предшествующих сварке операций на появление рассматриваемых дефектов были изготовлены образцы из алюминиевого сплава системы Al-Fe-Si. Примерный химический состав алюминиевого сплава в соответствии с ГОСТ 4784-97³ представлен в табл. 1.

Для получения заготовок применили два способа. Одни заготовки получали ме-

тодом механической обработки – фрезерованием контура и окон обнижения деталей. Другие заготовки получали фрезерованием контура с последующим выполнением окон обнижения методом РХТ. Для определения влияния направления проката листа образцы толщиной 1,5 мм раскраивали в разном направлении (табл. 2).

Таблица 1

Химический состав сплава системы Al-Fe-Si

Table 1

Chemical composition of the Al-Fe-Si system alloy

Номер образца	Элемент (содержание, %)							
	Al	Fe	Si	Cu	Mn	Zn	Ti	Mg
Первый	98	0,30	0,30	–	0,025	1,3	0,15	–
Второй	99,30	0,30	0,30	0,02	0,025	0,1	0,15	0,05

³ГОСТ 4784-97. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые. Марки; принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации, протокол № 12 от 21.11.1997 г. /GOST 4784-97. Aluminium and wrought aluminium alloys. Grades; adopted by the Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification, Minutes No. 12 of 21 November 1997.



Таблица 2

Характеристики исследуемых образцов

Table 2

Characteristics of the samples under investigation

Образец	Количество образцов, шт.	Направление раскроя	Вид обработки	Допустимая толщина мест утонения, мм
Обшивка № 1	1	Поперек проката листа	РХТ	$1,0 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,25 \end{pmatrix}$
			механическая	
Обшивка № 2	1	Поперек проката листа	РХТ	$1,0 \begin{pmatrix} +0,15 \\ -0,1 \end{pmatrix}$
			механическая	
Обшивка № 1	2	Вдоль проката листа	РХТ	$1,0 \begin{pmatrix} +0,15 \\ -0,1 \end{pmatrix}$
			механическая	
Обшивка № 2	2	Вдоль проката листа	РХТ	$1,0 \begin{pmatrix} 0 \\ -0,25 \end{pmatrix}$
			механическая	

При размерном химическом травлении заготовки облегчали путем удаления слоя материала с поверхности образца. Нужную толщину в местах утонения получали растворением металла в травителе (в результате химической реакции). Участки деталей, не подлежащие растворению, покрывали защитным слоем химически стойкого материала. Площадь вытравливаемых участков определялась конструктивными особенностями образцов. Используемое для травления оборудование представлено на рис. 1.

При механическом способе деталь изготавливали на обрабатывающем центре

PORTATEC (рис. 2). Детали обшивки вырезали из листа по картам раскроя, сначала фрезеровали окна обнижения, затем вырезали саму обшивку по контуру.

После этих операций контролировали полученную геометрию на прилегание по плите на наличие несоответствий с чертежами. Также проводили внешний осмотр на отсутствие повреждений (царапин, забоин, трещин). С помощью комплекта для визуально-измерительного контроля определяли отклонения геометрических параметров. Толщину образцов в местах утонения измеряли электронным толщиномером марки PCE-TG 250.



Рис. 1. Оборудование для размерного химического травления: 1 – ванна; 2 – травитель
Fig. 1. Equipment for dimensional chemical etching: 1 – tank; 2 – etching agent



Рис. 2. Обрабатывающий центр PORTATEC: 1 – блок управления;

2 – высокоскоростной портал; 3 – рабочий стол

Fig. 2. Machining center PORTATEC: 1 – control unit; 2 – high-speed portal, 3 – working platform

Качество подготовки поверхностей деталей под сварку контролировали по контактному сопротивлению. Допускаемое значение сопротивления не превышало 120 мкОм.

Заготовки «обшивки» толщиной 1,5 и «элемент жесткости» толщиной 2 мм со-

единяли контактной точечной сваркой. Сборку под сварку производили с использованием пружинных фиксаторов. Сварку производили на машине точечной контактной сварки МТВ-80.02-1 током низкой частоты (рис. 3).

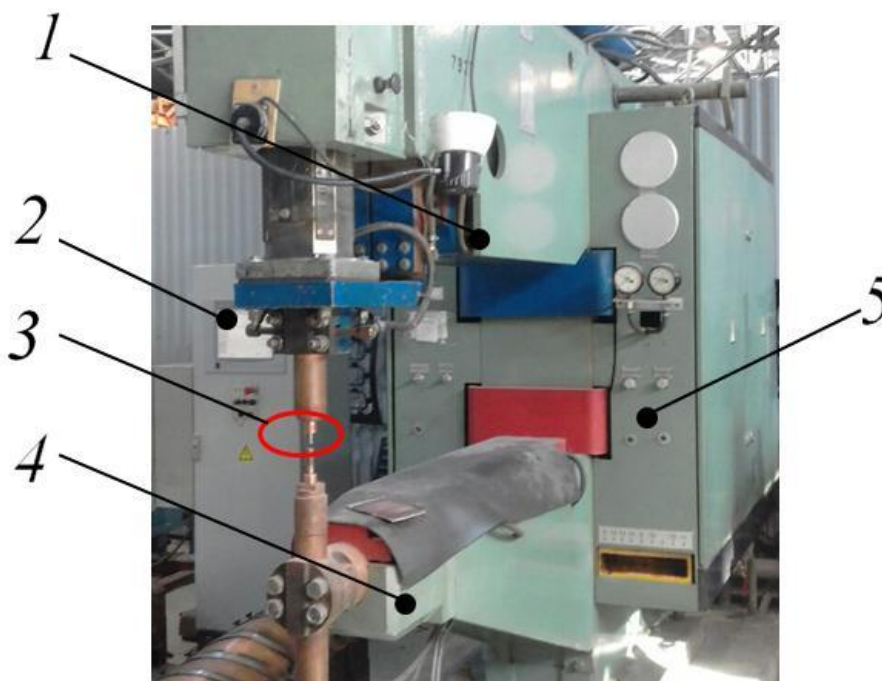


Рис. 3. Машина контактной сварки МТВ-80.02-1:

1 – верхняя консоль; 2 – шкаф управления циклограммой сварки; 3 – электрододержатель;

4 – нижняя консоль; 5 – корпус машины

Fig. 3. Resistance welding machine MTV 80.02-1:

1 – upper console; 2 – welding cyclogram control cabinet; 3 – welding electrode holder;

4 – lower console; 5 – machine housing



Точки сварки располагали в соответствии с чертежами конструкций, в нашем случае сварку образца № 2 производили, как показано на рис. 4. Параметры сварных точек выбраны по ГОСТ 15878-79⁴.

Основные параметры режима контактной точечной сварки образцов приведены в табл. 3.

После прихватки элементов обшивки и жесткости проводили контроль расположения точек прихватки. После сварки осуществляли контроль соединений на отсутствие прожогов, вмятин. Контролировали параметры сварных точек и их расположение (шаг между сварными точками). Наличие в соединениях дефектов выявляли с использованием инструмента для визуально-измерительного контроля.

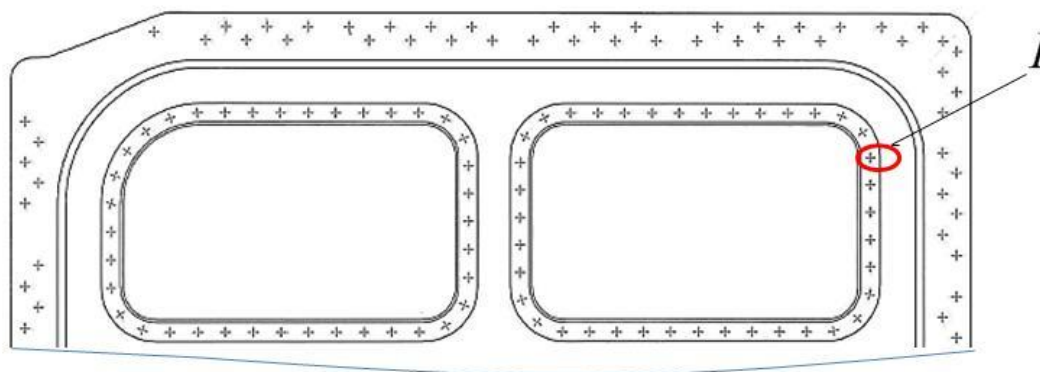


Рис. 4. Свариваемый образец № 2: 1 – сварная точка диаметром не более 4,5 мм
Fig. 4. Welded specimen No. 2: 1 – weld spot with the diameter less than 4.5 mm

Таблица 3

Параметры режима контактной сварки

Table 3

Resistance welding mode parameters

Диаметр электрода, мм		Радиус заточки, мм		Сила тока, А	Усилие сжатия, кН, при		Диаметр точки, мм
верхний	нижний	верхний	нижний		сварке	проковке	
20	25	75	100	40	4	9	4,0

Результаты и обсуждение

В результате проведенных экспериментов обнаружено, что после механической обработки образцов № 1 с толщинами окон обнижения 0,68–0,75 мм, образцов № 2 с толщинами окон обнижения 0,88–0,96 мм выявлены остаточные деформации в виде отклонений поверхности

от заданной геометрии.

На образцах № 1 с толщинами окон обнижения 0,9 мм и образцах № 2 с толщинами окон 1,1 мм, изготовленных методом РХТ, отклонений геометрии и остаточных деформаций не выявлено (рис. 5).

⁴ГОСТ 15878-79. Контактная сварка. Соединения сварные. Конструктивные элементы и размеры; введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 28.05.1979 г. № 1926 / GOST 15878-79. Resistance welding. Welded joints. Design elements and dimensions; put into operation by the Order of the USSR State Committee for Standards of 28 May 1979. No. 1926.



Рис. 5. Сварной образец, полученный из заготовок обшивки № 1 и элемента жесткости:

1 – окно обнижения; 2 – сварная точка

Fig. 5. Welded specimen obtained from the blanks of skin no.1 and a stiffener:

1 – thinning window; 2 – weld spot

После контактной сварки на деталях № 1 и 2 с окнами обнижения, выполненными методом механической обработки, вне зависимости от направления раскроя листа были выявлены дефекты в виде хлопунгов.

После контактной сварки на деталях дефекты в виде хлопунгов на крышках люков № 1 и 2 с окнами обнижения, выполненными методом РХТ, вне зависимости от направления раскроя листа, выявлены не были. При контроле полученные детали не имели отклонений от заданной геометрии.

Результаты контроля сварных образцов – обшивок № 2, полученных мето-

дом механической обработки с увеличенными толщинами окон обнижения, показали следующее:

- после проведения сварочных работ на обшивках с толщиной окон обнижения 1,0 мм наблюдалось отклонение поверхности от плоскостности, характеризующееся двойной кривизной (появление дефектов – хлопунгов);

- на обшивках с увеличенной толщиной 1,15 мм дефекты сварных соединений в виде отклонения поверхности от плоскостности не обнаружены.

Выводы

Исследования показали, что на появление дефектов в виде выпуклости поверхностей после контактной сварки влияют виды предшествующих операций технологического процесса.

После сварки деталей, выполненных методом размерного химического травления с окнами обнижения в пределах допуска $1,0\left(\begin{smallmatrix} +0,15 \\ -0,25 \end{smallmatrix}\right)$ мм вне зависимости от направления раскроя листа, дефекты не

наблюдаются.

После точечной сварки заготовок с окнами обнижения $1,0\left(\begin{smallmatrix} 0 \\ -0,25 \end{smallmatrix}\right)$ мм, выполненных методом механической обработки, вне зависимости от направления раскроя листа, появляются недопустимые дефекты в виде хлопунгов. Устранить появление таких дефектов удалось путем увеличения толщины окон обнижения до максимально допустимой – 1,15 мм.



Библиографический список

1. Козловский С.Н. Основы теории и технологии контактной точечной сварки: монография. Красноярск: Изд-во СибГАУ, 2003. 230 с.
2. Тюдешев В.С., Кочергин Д.А., Подрезов Н.В., Козловский С.Н. Искривление деталей при их сближении в процессе точечной сварки // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. № 11. С. 272–273.
3. Орлов Б.Д., Чулошников П.Л. [и др.]. Контроль точечной и роликовой электросварки. М.: Машиностроение, 1973. 304 с.
4. Царегородцева М.М., Шпигоревская М.И., Козловский С.Н. Определение устойчивости процесса точечной сварки по технологическим параметрам // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2013. Т. 1. № 9. С. 120–121.
5. Lum I., Fukumoto S., Biro E., Boomer D.R., Zhou Y. Electrode Pitting in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy 5182 // Metallurgical and materials transactions. 2004. Vol. 35A. P. 217–225.
6. Rashid M., Medley J.B., Zhou Y. Electrode Work-sheet Interface Behaviour During Resistance Spot Welding of Al Alloy 5182 // Science and Technology of Welding and Joining. 2009. Vol. 14 (4). P. 295–304.
7. Khan J.A., Xu L., Chao Y.J. Prediction of Nugget Development During Resistance Spot Welding Using Coupled Thermal-Electrical-Mechanical Model // Science and Technology of Welding and Joining. 1999. Vol. 4 (4). P. 201–207.
8. Куликов В.П., Фурманов С.М. Пути снижения деформации лицевых поверхностей изделий при контактной точечной сварке // Сварочные технологии и оборудование. 2003. № 3. С. 16–27.
9. Линдт Е.В., Мужикбаев А.С., Козловский С.Н. Пластические деформации металла при точечной контактной сварке // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2015. Т. 1. № 11. С. 259–260.
10. Гуреева М.А., Грушко О.Е., Ключков Г.Г. Исследование свойств сварных соединений алюминиевого сплава В1341, выполненных контактной точечной сваркой // Заготовительные производства в машиностроении 2016. № 7. С. 8–12.
11. Попковский В.А., Березиенко В.П. Поле остаточных напряжений при контактной точечной сварке // Автоматическая сварка. 1987. № 8. С. 10–14.
12. Han L., Thornton M., Boomer D., Shergold M. Effect of aluminium sheet surface conditions on feasibility and quality of resistance spot welding // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210. No. 8. P. 1076–1082.
13. Karimi M.R., Sedighi M., Afshari D. Thermal contact conductance effect in modeling of resistance spot welding process of aluminum alloy 6061-T6 // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015. Vol. 77. No. 5-8. P. 885–895.

References

1. Kozlovskii S.N. *Osnovy teorii i tekhnologii kontaktnoi tochechnoi svarki* [Fundamentals of the theory and technology of spot resistance welding]. Krasnoyarsk: SibSAU Publ., 2003, 230 p. (In Russian).
2. Tyudeshev V.S., Kochergin D.A., Podrezov N.V., Kozlovskii S.N. Curvature of details at their approach in the course of point welding. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics]. 2015, vol. 1, no. 11, pp. 272–273. (In Russian).
3. Orlov B.D., Chuloshnikov P.L. [at al.]. *Kontrol' tochechnoi i rolikovoi elektrosvarki* [Control of spot and roller welding]. Moscow: Mechanical Engineering Publ., 1973, 304 p. (In Russian).
4. Tsaregorodtseva M.M., Shpigorevskaya M.I., Kozlovskii S.N. Determination of spot welding process stability by technological parameters. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual problems of aviation and cosmonautics]. 2013, vol. 1, no. 9, pp. 120–121. (In Russian).
5. Lum I., Fukumoto S., Biro E., Boomer D.R., Zhou Y. Electrode Pitting in Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy 5182. *Metallurgical and materials transactions*. 2004, vol. 35A, pp. 217–225.
6. Rashid M., Medley J.B., Zhou Y. Electrode Work-sheet Interface Behaviour during Resistance Spot Welding of Al Alloy 5182. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2009, vol. 14 (4), pp. 295–304.
7. Khan J.A., Xu L., Chao Y.J. Prediction of Nugget Development During Resistance Spot Welding Using Coupled Thermal-Electrical-Mechanical Model. *Science and Technology of Welding and Joining*. 1999, vol. 4 (4), pp. 201–207.
8. Kulikov V.P., Furmanov S.M. Methods to reduce deformation of product front surfaces at spot resistance welding. *Svarochnye tekhnologii i oborudovanie* [Welding Technologies and Equipment]. 2003, no. 3, pp. 16–27. (In Russian).
9. Lindt E.V., Muzhikbaev A.S., Kozlovskii S.N. Plastic strains of metal spot contact welding. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Actual Problems of Aviation and Cosmonautics]. 2015, vol. 1, no. 11, pp. 259–260. (In Russian).
10. Gureeva M.A., Grushko O.E., Klovchov G.G. Studying properties of welded joints of aluminum alloy B1341 performed by contact point welding. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii* [Blanking Productions in Mechanical Engineering (Press Forging, Foundry and other Productions)]. 2016, no. 7, pp. 8–12. (In Russian).
11. Popkovskii V.A., Berezienco V.P. Field of residual stresses under spot resistance welding. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic Welding]. 1987, no. 8, pp. 10–14. (In Russian).
12. Han L., Thornton M., Boomer D., Shergold M. Effect



of aluminium sheet surface conditions on feasibility and quality of resistance spot welding. Journal of Materials Processing Technology. 2010, vol. 210, no. 8, pp. 1076–1082.

13. Karimi M.R., Sedighi M., Afshari D. Thermal contact conductance effect in modeling of resistance spot welding process of aluminum alloy 6061-T6. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2015, vol. 77, no. 5-8, pp. 885–895.

Критерии авторства

Астафьева Н.А., Бузин А.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Astafieva N.A., Buzin A.S. 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 51:621.891

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-19-32>

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ РАДИАЛЬНОГО ПОДШИПНИКА, СМАЗЫВАЕМОГО РАСПЛАВОМ, В ТУРБУЛЕНТНОМ РЕЖИМЕ ТРЕНИЯ С УЧЕТОМ ЗАВИСИМОСТИ ВЯЗКОСТИ ОТ ДАВЛЕНИЯ И ТЕМПЕРАТУРЫ

© Е.О. Лагунова¹

Ростовский государственный университет путей сообщения,
344038, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Ростовского Стрелкового Полка Народного Ополчения, 2.

РЕЗЮМЕ. Статья посвящена разработке расчетной модели бесконечного радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия, одновременно учитывая зависимость вязкости смазочного материала от давления и температуры. Дана оценка влияния параметра K , обусловленного расплавом легкоплавкого металлического покрытия поверхности подшипниковой втулки, параметра α , обусловленного зависимостью вязкости смазочного материала от давления, и параметра β , обусловленного зависимостью вязкости смазочного материала от температуры, на основные рабочие характеристики радиального подшипника скольжения. **ЦЕЛЬЮ** работы является формирование уточненных расчетных моделей бесконечных радиальных подшипников, работающих в режиме гидродинамического смазывания, когда есть смазочный материал и расплав легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки, при одновременном учете зависимости смазочного материала от давления и температуры для применения в инженерной практике. **МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ.** Предложены новые математические модели, описывающие движение несжимаемого смазочного материала в приближении для «тонкого слоя», уравнение неразрывности и выражения скорости диссипации энергии для определения профиля расплавленной поверхности легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки с учетом влияния ряда дополнительных факторов. Выполнен сравнительный анализ имеющихся и вновь полученных результатов, подтверждающий приближенность новой модели к реальной практике. **РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** Разработаны новые многопараметрические выражения для основных рабочих характеристик рассматриваемой пары трения, учитывающих зависимость вязкости смазочного материала от давления и температуры при наличии смазочного материала и расплава легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки. Дана оценка влияния параметров, учитывающих целую гамму переменных факторов, обусловленных расплавом поверхности легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки. **ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В предлагаемой работе обобщено влияние многопараметрических переменных факторов, что существенно усложняет задачу, но делает ее решение универсальным и востребованным в современных трибоузлах. Результаты численного анализа полученных теоретических исследований показывают, что опоры скольжения, работающие на расплаве легкоплавкого покрытия, обладают аномально низким коэффициентом трения (зависимость коэффициента трения от параметра, обусловленного расплавом, близка линейной). Полученные результаты могут быть использованы в машиностроении, авиастроении, приборостроении и т.д., то есть там, где подача смазочного материала связана с трудностями.

Ключевые слова: гидродинамика, радиальный подшипник, вязкий несжимаемый жидкий смазочный материал, расплавленная поверхность подшипниковой втулки, зависимость вязкости смазочного материала от давления и температуры.

Информация о статье. Дата поступления 22 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 22 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Лагунова Е.О. Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, в турбулентном режиме трения с учетом зависимости вязкости от давления и температуры // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 19–32. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-19-32

¹Лагунова Елена Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры высшей математики, e-mail: lagunova@rambler.ru

Elena O. Lagunova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, e-mail: lagunova@rambler.ru



**CALCULATED MODEL OF THE RADIAL BEARING LUBRICATED BY THE MELT
IN THE TURBULENT FRICTION MODE TAKING INTO ACCOUNT VISCOSITY
DEPENDENCE ON PRESSURE AND TEMPERATURE**

E.O. Lagunova

Rostov State Transport University,
2, Rostovskogo Strelkovogo Polka Narodnogo Opolcheniya sq., Rostov-on-Don, 344038, Russian Federation

ABSTRACT. The article deals with the development of the calculation model of the infinite radial bearing lubricated by low-melting coating with simultaneous consideration of lubricant viscosity dependence on pressure and temperature. The estimation is given to the influence of the parameter K caused by the melt of a low-melting metallic coating of the bearing bush surface, the parameter α caused by the lubricant viscosity dependence on pressure, and the parameter β caused by the lubricant viscosity dependence on temperature on the main performance characteristics of a radial slide bearing. The **PURPOSE** of the article is formation of the specified calculated models of infinite radial bearings operating in the mode of hydrodynamic lubrication when there is a lubricant and a melt of a low-melting coating of the bearing bush under simultaneous consideration of lubricant dependence on pressure and temperature for the application in engineering practice. **MATERIALS AND METHODS.** The article proposes new mathematical models describing the motion of incompressible lubricant in the approximation for the "fine coat", a continuity equation and expressions of energy dissipation rate for the determination of the profile of the low-melting coating melted surface of the bearing bush taking into account the influence of a number of additional factors. The performed comparison of available and newly received results confirms the approximation of the new model to the real practice. **RESEARCH RESULTS.** New multiple parameter expressions have been developed for the main performance characteristics of the considered friction couple that take into account the dependence of lubricant viscosity on pressure and temperature in the presence of the lubricating material and the melt of a low-melting coating of the bearing bush. An assessment is given to the influence of the parameters taking into account a range of variable factors caused by the melt of the surface of a bearing bush low-melting coating. **DISCUSSION AND CONCLUSION.** The present work summarizes the influence of the multiparameter variable factors. The latter significantly complicates the task but makes its solution universal and demanded in modern friction elements. The results of the numerical analysis of the obtained theoretical researches show that the sliding supports operating on the melt of the low-melting coating have an anomalously low friction coefficient (dependence of the friction coefficient on the parameter caused by the melt is close to the linear one). The received results can be used in mechanical engineering, aircraft industry, instrument-making industry and other industries where lubricant supply is associated with difficulties. **Keywords:** hydrodynamics, radial bearing, viscous incompressible fluid lubricant, melted surface of the bearing bush, dependence of lubricant viscosity on pressure and temperature

Information about the article. Received April 22, 2018; accepted for publication June 22, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Lagunova E.O. Calculated model of the radial bearing lubricated by the melt in the turbulent friction mode taking into account viscosity dependence on pressure and temperature. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 19–32. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-19-32 (In Russian).

Введение

Одним из методов решения конструктивно-эксплуатационных задач может быть применение смазывания расплавом легкоплавкого покрытия подшипниковых втулок.

Сегодня существует много различных технологий диффузионной металлизации, при этом большинство из них являются сложными и требуют применения дорогостоящего оборудования. Это делает их промышленно нереализуемыми. На фоне этих технологий выгодно выделяется технология диффузионной металлизации сталей из среды легкоплавких жидкоталлических растворов. Перспективность данной технологии связана с возможностью получения качественных изделий и регулирования свойств данных покрытий при варьировании технологических режимов.

Применение вышеуказанной технологии позволяет получать на поверхности изделий многокомпонентные и однокомпонентные диффузионные покрытия на основе разнообразных металлических элементов.



Смазывание расплавом изучалось во многих прикладных задачах, в частности в процессах формоизменения и резания металлов²⁻⁵ [1–3]. Гидродинамическому расчету радиальных подшипников бесконечной длины в условиях отсутствия смазочного вещества и учета зависимости вязкости смазочного материала от давления посвящены работы [4, 5], в условиях применения неньютоновских смазочных материалов – работы [6–16]. Разработке расчетной модели радиальных и упорных подшипников скольжения, обусловленной расплавом, в случае, когда вязкость смазочного материала зависит от давления, посвящены работы [17–20]. Существенным недостатком рассматриваемой пары трения, работающей на смазывании расплавом, является низкая несущая способность. Кроме того, процесс смазывания не является самоподдерживающимся.

Таким образом, разработка расчетной модели подшипников скольжения, которые работают на смазочных материалах в виде металлических расплавов, в турбулентном режиме трения при учете зависимости вязкости смазочного материала от давления и температуры представляет собой перспективное направление теоретических исследований современной трибологии. Последнее определяет новизну и актуальность полученного решения.

Постановка задачи

Рассмотрим модель установившегося движения смазочного материала в зазоре радиального подшипника скольжения с нанесенным на него слоем легкоплавкого покрытия.

Вращение вала происходит с угловой скоростью Ω , при этом подшипниковая втулка неподвижна. Предполагается, что рабочий зазор полностью заполнен смазочным материалом. На плавление поверхности материала подшипниковой втулки идет все тепло, которое выделяется в смазочной пленке.

Зависимость вязкости смазочного материала от давления и температуры зададим как

$$\mu' = \mu_0 e^{\alpha' p' - \beta' T'} \quad (1)$$

где μ_0 – характерная вязкость; μ' – коэффициент динамической вязкости смазочного материала; p' – гидродинамическое давление в смазочном слое⁶.

Исходные уравнения и граничные условия

Движение смазочного материала опишем уравнением течения вязкой несжимаемой жидкости в приближении для случая «тонкого слоя» и уравнением неразрывности:

²Физические величины. Справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с. / Physical quantities. Reference book / under edition of I.S. Grigoriev, E.Z. Meilikhov M.: Energoatomizdat, 1991. 1232 p.

³Рабинович В.А., Хавин З.Я. Краткий химический справочник. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Химия, 1991. 432 с. / Rabinovich V.A., Khavin Z.Ya. Brief reference book on Chemistry. 3d edition, Revised and enlarged. L.: Chemistry, 1991. 432 p.

⁴Перельман В.И. Краткий справочник химика. М.-Л.: Химия, 1964. 624 с. / Perelman V.I. Chemists's quick reference book. M.-L.: Chemistry, 1964. 624 p.

⁵Петрунин И.Е. Справочник по пайке. 3-е изд. М.: Машиностроение, 2003. 480 с. / Petrunin I.E. Handbook of soldering. 3d edition. M.: Mashinostroyeniye, 2003. 480 p.

⁶Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. 7-е изд., испр. М.: Дрофа, 2003. 840 с. / Loitsyansky L.G. Mechanics of fluid and gas: textbook for universities. Moscow: Drofa Publ., 2003. 840 p.



$$j\mu' \frac{\partial^2 v_\theta}{\partial r'^2} = \frac{dp'}{d\theta}, \quad \frac{\partial v_{r'}}{\partial r'} + \frac{v_{r'}}{r'} + \frac{1}{r'} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} = 0. \quad (2)$$

Здесь v_θ , $v_{r'}$ – компоненты вектора скорости смазочной среды⁶.

Рассмотрим полярную систему координат с полюсом в центре подшипниковой втулки (рис. 1). Уравнения контура вала, поверхности подшипниковой втулки, покрытой металлическим расплавом, и расплавленной поверхности легкоплавкого покрытия подшипниковой втулки запишем в виде

$$r' = r_0(1+H), \quad r' = r_1, \quad r' = r_1 + \lambda' f(\theta), \quad (3)$$

где $H = \varepsilon \cos \theta - \frac{1}{2} \varepsilon^2 \sin^2 \theta + \dots$, $\varepsilon = \frac{e}{r_0}$; r_1 – радиус подшипниковой втулки, покрытой металлическим расплавом; r_0 – радиус вала; ε – относительный эксцентриситет; e – эксцентриситет; $\lambda' f(\theta)$ – ограниченная функция при $\theta \in [0 \div 2\pi]$, подлежит определению [3].

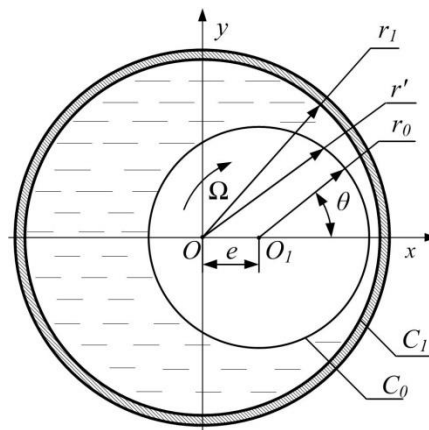


Рис. 1. Расчетная схема
Fig. 1. Calculation model

В рассматриваемом случае граничные условия запишем с точностью до членов $O(\varepsilon^2)$:

$$\begin{aligned} v_\theta &= 0, \quad v_{r'} = 0 \quad \text{при} \quad r' = r_1 + \lambda' f(\theta); \\ v_\theta &= r_0 \Omega, \quad v_{r'} = -\Omega e \sin \theta, \quad \text{при} \quad r' = r_0 + e \cos \theta; \\ p'(0) &= p'(2\pi) = \frac{p_g}{p_*}, \quad \eta' f(\theta) = \Phi(\theta). \end{aligned} \quad (4)$$

Чтобы определить функцию $\lambda' f(\theta)$, обусловленную расплавленной поверхностью подшипника, применим формулу скорости диссипаций энергии:

$$\frac{d\lambda' f(\theta) r_0}{d\theta} \cdot \Omega L' = 2\mu' \int_{r_1 + \lambda' f(\theta)}^{r_0 + e \cos \theta} \left(\frac{\partial v_\theta}{\partial r'} \right)^2 dr', \quad (5)$$

где L' – удельная теплота плавления на единицу объема.

Размерные величины связаны с безразмерными соотношениями:



$$\begin{aligned} r' &= r_1 - \delta r, \quad \delta = r_1 - r_0; \quad v_0 = \Omega r_0 v; \quad v_r' = \Omega \delta u; \quad p' = p^* p; \quad p^* = \frac{\mu_0 \Omega r_0^2}{\delta^2}; \\ \mu' &= \mu_0 \mu; \quad \alpha' = \frac{\alpha}{p^*}; \quad \beta = \beta' T^*; \quad T' = T^* T; \quad T^* = \frac{\mu_0 \Omega^2 r_0^2}{I \lambda}. \end{aligned} \quad (6)$$

Подставим соотношения (6) в систему дифференциальных уравнений (2) и (5), в вышеуказанные граничные условия (4) и получим систему дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0; \quad \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} = \frac{1}{e^{\alpha p - \beta T}} \frac{dp}{d\theta}; \quad \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial \theta} = 0; \quad (7)$$

$$\frac{1}{j\mu(\theta)} \frac{d\Phi(\theta)}{d\theta} = K \int_{-\eta_1 f(\theta)}^{1-\eta \cos \theta} \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right)^2 dr,$$

где $K = \frac{2\mu_0 \Omega r_0}{L' \delta}$, с соответствующими граничными условиями:

$$\begin{aligned} v &= 1, \quad u = -\eta \sin \theta, \quad \text{при } r = 1 - \eta \cos \theta; \\ v &= 0, \quad u = 0 \quad \text{при } r = 0 - \Phi(\theta); \quad p(0) = p(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $\eta = \frac{e}{\delta}; \quad \eta_1 = \frac{\lambda'}{\delta}$.

Параметр K , обусловленный расплавом и скоростью диссипации энергии, считаем малым. Тогда функцию $\Phi(\theta)$ будем искать по выражению:

$$\Phi(\theta) = -K\Phi_1(\theta) - K^2\Phi_2(\theta) - K^3\Phi_3(\theta) - \dots = H. \quad (9)$$

Соответствующие граничные условия на контуре $r = -\Phi(\theta)$ для безразмерных компонентов скорости u и v можно записать формулами:

$$\begin{aligned} v(0 - H(\theta)) &= v(0) - \left(\frac{\partial v}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} H(\theta) - \left(\frac{\partial^2 v}{\partial r^2} \right) \Big|_{r=0} H^2(\theta) - \dots = 0; \\ u(0 - H(\theta)) &= u(0) - \left(\frac{\partial u}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} H(\theta) - \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} \right) \Big|_{r=0} H^2(\theta) - \dots = 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Будем искать асимптотическое решение системы уравнений (7) при учете вышеуказанных граничных условий (8) и (10) в виде рядов по степеням малого параметра K :

$$v = v_0(r, \theta) + K v_1(r, \theta) + K^2 v_2(r, \theta) + \dots;$$



$$\begin{aligned}
 u &= u_0(r, \theta) + Ku_1(r, \theta) + K^2u_2(r, \theta) + \dots; \\
 \Phi(\theta) &= -K\Phi_1(\theta) - K^2\Phi_2(\theta) - K^3\Phi_3(\theta) - \dots; \\
 p(\theta) &= p_0 + Kp_1(\theta) + K^2p_2(\theta) + K^3p_3(\theta) \dots, \\
 T(\theta) &= T_0(\theta) + KT_1(\theta) + K^2T_2(\theta) + K^3T_3(\theta) \dots, \\
 \mu(\theta) &= \mu_0(\theta) + K\mu_1(\theta) + K^2\mu_2(\theta) + K^3\mu_3(\theta) \dots
 \end{aligned} \tag{11}$$

Подставляя выражения (11) в систему дифференциальных уравнений (7) и учитывая соответствующие граничные условия (8), получим следующие уравнения:
– для нулевого приближения:

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial r^2} = \frac{1}{j\mu_0(\theta)} \frac{dp_0}{d\theta}, \quad \frac{\partial v_0}{\partial \theta} + \frac{\partial u_0}{\partial r} = 0, \tag{12}$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned}
 v_0 &= 1, \quad u_0 = -\eta \sin \theta \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta \cos \theta; \\
 v_0 &= 0, \quad u_0 = 0 \quad \text{при} \quad r = 0; \quad p_0(0) = p_0(2\pi) = \frac{p_g}{p_*};
 \end{aligned} \tag{13}$$

– для первого приближения:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 v_1}{\partial r^2} &= \frac{1}{j\mu_0(\theta)} \frac{dp_1}{d\theta} - \frac{\mu_1(\theta)}{j\mu_0^2(\theta)} \frac{dp_0}{d\theta}; \quad \frac{\partial v_1}{\partial \theta} + \frac{\partial u_1}{\partial r} = 0; \\
 \frac{1}{j\mu_0(\theta)} \frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} &= K \int_0^{1-\eta \cos \theta} \left(\frac{\partial v_0}{\partial r} \right)^2 dr
 \end{aligned} \tag{14}$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned}
 v_1 &= \left(\frac{\partial v_0}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta); \quad u_1 = \left(\frac{\partial u_0}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta); \\
 v_1 &= 0; \quad u_1 = 0 \quad \text{при} \quad r = 1 - \eta \cos \theta; \\
 p_1(0) &= p_1(2\pi) = 0; \quad K\Phi_1(0) = K\tilde{\alpha}, \quad \Phi(0) = \Phi(2\pi) = \tilde{\alpha}.
 \end{aligned} \tag{15}$$

Точное автомодельное решение

Точное автомодельное решение задачи для нулевого приближения будем искать в виде:



$$\begin{aligned} v_0 &= \frac{\partial \psi_0}{\partial r} + V_0(r, \theta); \quad u_0 = -\frac{\partial \psi_0}{\partial \theta} + U_0(r, \theta); \\ \psi_0(r, \theta) &= \tilde{\psi}_0(\xi); \quad \xi = \frac{r}{h(\theta)}; \\ V_0(r, \theta) &= \tilde{v}(\xi); \quad U_0(r, \theta) = -\tilde{u}_0(\xi) \cdot h'(\theta). \end{aligned} \quad (16)$$

Далее выражения (16) подставим в систему дифференциальных уравнений (12), учитывая вышеописанные граничные условия (13). Получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\tilde{\psi}_0''' = \tilde{C}_2; \quad \tilde{v}_0'' = \tilde{C}_1; \quad \tilde{u}_0'(\xi) + \xi \tilde{v}_0'(\xi) = 0; \quad \frac{dp_0}{d\theta} = j\mu_0(\theta) \left(\frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)} \right) \quad (17)$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} \tilde{\psi}_0'(0) &= 0, \quad \tilde{\psi}_0'(1) = 0, \quad \tilde{u}_0(1) = -\eta \sin \theta, \quad \tilde{v}_0(1) = 0; \\ \tilde{u}_0(0) &= 0, \quad \tilde{v}_0(0) = 1, \quad \int_0^1 \tilde{u}_0(\xi) d\xi = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Решение задачи Коши (17)–(18) находим интегрированием:

$$\tilde{\psi}_0'(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2}(\xi^2 - \xi); \quad \tilde{v}_0(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} - \left(1 + \frac{\tilde{C}_1}{2}\right)\xi + 1; \quad \tilde{C}_1 = 6. \quad (19)$$

Применяя условие $p_0(0) = p_0(2\pi) = \frac{p_g}{p^*}$, получим следующее выражение:

$$\tilde{C}_2 = -\frac{12(1 - \eta^2)}{2 + \eta^2}. \quad (20)$$

Определение гидродинамического давления

Для нахождения гидродинамического давления для нулевого приближения сначала определим $\mu_0(\theta)$. Для этого выражение $\mu_0(\theta) = e^{\alpha p_0 - \beta T_0}$ продифференцируем:

$$\frac{d\mu_0(\theta)}{d\theta} = j\mu_0(\theta) \left(\alpha \frac{dp_0}{d\theta} - \beta \frac{dT_0}{d\theta} \right). \quad (21)$$

Для определения $\frac{dT_0}{d\theta}$ используем формулу для скорости диссипации энергии:

$$\frac{dT_0}{d\theta} = -\frac{24\mu_0\mu_0(\theta)\beta\Omega r_0 h(\theta)}{T^* c_p \delta^2 \tilde{C}_2} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}_0''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_0'(\xi)}{h(\theta)} \right)^2 d\xi. \quad (22)$$



Подставляя (22) в (21) и сделав ряд преобразований, получим:

$$\frac{1}{j\mu_0^2(\theta)} \frac{d\mu_0(\theta)}{d\theta} = \alpha \left(\frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)} \right) + \frac{24\mu_0\Omega r_0\beta h(\theta)}{T^*c_p\delta^2\tilde{C}_2} \int_0^1 \left(\frac{\tilde{\psi}_0''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_0'(\xi)}{h(\theta)} \right)^2 d\xi, \quad (23)$$

где c_p – теплоемкость при постоянном давлении.

Интегрируя (23), получим:

$$\mu_0(\theta) = \frac{1}{1 - \alpha(\tilde{C}_1 J_2(\theta) + \tilde{C}_2 J_3(\theta)) - \frac{D}{\tilde{C}_2} \beta [\Delta_1 J_3(\theta) + \Delta_2 J_2(\theta) + \Delta_3 J_1(\theta)]}, \quad (24)$$

где

$$D = \frac{24\mu_0\Omega r_0}{T^*c_p\delta^2}; \quad \Delta_1 = \int_0^1 (\tilde{\psi}_0''(\xi))^2 d\xi = \frac{\tilde{C}_2^2}{12}; \quad \Delta_2 = 2 \int_0^1 (\tilde{\psi}_0''(\xi) \cdot \tilde{v}_0'(\xi)) d\xi = \frac{1}{6} \tilde{C}_1 \tilde{C}_2;$$

$$\Delta_3 = \int_0^1 (\tilde{v}_0'(\xi))^2 d\xi = 4; \quad J_k(\theta) = \int_0^\theta \frac{d\theta}{h^k(\theta)}.$$

Подставим значения $\tilde{C}_1$, $\tilde{C}_2$, Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 , $J_3(\theta)$, $J_2(\theta)$, $J_1(\theta)$ в уравнение (24), а затем полученную функцию $\mu_0(\theta)$ заменим ее усредненным интегральным значением:

$$\tilde{\mu}_0 = 1 - 2D\pi^2\beta \left(\frac{12(1-\eta^2)(-1-2\eta^2)}{(2+\eta^2)^2} + 4 \right) - \frac{36\pi^2\alpha\eta^2}{2+\eta^2}. \quad (25)$$

Следовательно,

$$p_0 = j\tilde{\mu}_0 \left[\frac{36\eta^2}{(2+\eta^2)\sqrt{1-\eta^2}} \operatorname{arctg} \left(\sqrt{\frac{1-\eta}{1+\eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) - \frac{6\eta\sin\theta}{(2+\eta^2)(1-\eta\cos\theta)} - \frac{6\sin\theta}{(2+\eta^2)(1-\eta\cos\theta)^2} \right] + \frac{p_g}{p^*}. \quad (26)$$

Для определения $\Phi_1(\theta)$ при учете уравнения (19) получим следующее равенство:

$$\frac{d\Phi_1(\theta)}{d\theta} = h(\theta) \int_0^1 \left(\frac{\psi_0''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_0'(\xi)}{h(\theta)} \right)^2 d\xi. \quad (27)$$

Непосредственно интегрируя выражение (27), получим:

$$\Phi_1(\theta) = \int_0^\theta \frac{\Delta_1 d\theta}{h^3(\theta)} + \int_0^\theta \frac{\Delta_2 d\theta}{h^2(\theta)} + \int_0^\theta \frac{\Delta_3 d\theta}{h(\theta)}, \quad (28)$$

Решим полученное уравнение (28), учитывая, что $K\Phi_1(0) = K\alpha^*$. В результате получим:



$$\Phi_1(\theta) = \left[\frac{4(1+2\eta^2)}{(2+\eta^2)} \arctg \left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) - \frac{6\eta(1+2\eta^2)\sin\theta}{(2+\eta^2)^2(1-\eta\cos\theta)} + \frac{6(1-\eta^2)\sin\theta}{(2+\eta^2)^2(1-\eta\cos\theta)^2} \right] + \tilde{\alpha}. \quad (29)$$

Для первого приближения ищем точное автомодельное решение в виде:

$$u_1 = \frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} + U_1(r, \theta); \quad v_1 = -\frac{\partial \psi_1}{\partial \theta} + V_1(r, \theta); \quad \psi_1(r, \theta) = \tilde{\psi}_1(\xi); \quad \xi = \frac{r}{h(\theta)}; \\ V_1(r, \theta) = \tilde{v}_1(\xi); \quad U_1(r, \theta) = -\tilde{u}_1(\xi) \cdot h'(\theta). \quad (30)$$

Подставим (30) в систему дифференциальных уравнений (14). Учитывая граничные условия (15), получим следующую систему дифференциальных уравнений:

$$\tilde{\psi}_1'''(\xi) = \tilde{C}_2, \quad \tilde{u}_1'' = \tilde{C}_1, \quad \tilde{u}_1' + \xi \tilde{v}_1' = 0, \quad \frac{1}{j\mu_0(\theta)} \frac{dp_1}{d\theta} - \frac{\mu_1(\theta)}{j\mu_0^2(\theta)} \frac{dp_0}{d\theta} = \frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)} \quad (31)$$

с граничными условиями:

$$\tilde{\psi}_1'(0) = 0, \quad \tilde{\psi}_1'(1) = 0; \quad \tilde{u}_1(1) = 0, \quad \tilde{v}_1(1) = 0; \\ \tilde{u}_1(0) = 0, \quad \tilde{v}_1(0) = M, \quad \int_0^1 \tilde{v}_1(\xi) d\xi = 0. \quad (32)$$

Непосредственным интегрированием получим:

$$\tilde{\psi}_1'(\xi) = \frac{\tilde{C}_2}{2} (\xi^2 - \xi), \quad \tilde{v}_1(\xi) = \tilde{C}_1 \frac{\xi^2}{2} + \left(\frac{\tilde{C}_1}{2} - M \right) \xi + M, \quad \tilde{C}_1 = 6M. \quad (33)$$

Воспользовавшись условием $p_1(0) = p_1(2\pi) = 0$, получим выражение для $\tilde{C}_2$:

$$\tilde{C}_2 = -\frac{6M(1-\eta^2)}{2+\eta^2}, \quad (34)$$

где

$$M = \sup_{\theta \in [0; 2\pi]} \left(\frac{\partial v_0}{\partial r} \right) \Big|_{r=0} \cdot \Phi_1(\theta) = \\ = \sup_{\theta \in [0; 2\pi]} \left(\frac{-2}{1-\eta\cos\theta} + \frac{6(1-\eta^2)}{(2+\eta^2)(1-\eta\cos\theta)^2} \right) \times \\ \times \left(\left[\frac{4(1+2\eta^2)}{(2+\eta^2)} \arctg \left(\sqrt{\frac{1+\eta}{1-\eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) - \frac{6\eta(1+2\eta^2)\sin\theta}{(2+\eta^2)^2(1-\eta\cos\theta)} + \frac{6(1-\eta^2)\sin\theta}{(2+\eta^2)^2(1-\eta\cos\theta)^2} \right] + \tilde{\alpha} \right)$$

Для нахождения гидродинамического давления из уравнения



$\frac{dp_1}{d\theta} - \frac{\mu_1(\theta)}{\tilde{\mu}_0} \frac{dp_0}{d\theta} = j\tilde{\mu}_0 \left(\frac{\tilde{C}_1}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{C}_2}{h^3(\theta)} \right)$ сначала определим $\mu_1(\theta)$. Для этого продифференцируем выражение $\mu_1(\theta) = e^{\alpha p_1 - \beta T_1}$:

$$\frac{d\mu_1(\theta)}{d\theta} = \alpha \mu_0(\theta) \frac{dp_1}{d\theta} + \alpha \mu_1(\theta) \frac{dp_0}{d\theta} - \beta \mu_1(\theta) \frac{dT_0}{d\theta} - \beta \mu_0(\theta) \frac{dT_1}{d\theta}. \quad (35)$$

Для определения $\frac{dT_1}{d\theta}$ используем формулу для скорости диссипации энергии:

$$\frac{dT_1}{d\theta} = -\frac{24\mu_0\mu_1(\theta)\beta\Omega r_0 h(\theta)}{T^* c_p \delta^2 \tilde{C}_2} \int_0^1 2 \left(\frac{\tilde{\psi}_0''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_0'(\xi)}{h(\theta)} \right) \left(\frac{\tilde{\psi}_1''(\xi)}{h^2(\theta)} + \frac{\tilde{v}_1'(\xi)}{h(\theta)} \right) d\xi. \quad (36)$$

Подставляя (36) в (35) и сделав ряд преобразований с точностью до членов $O(K\alpha\mu_1(\theta))$, получим:

$$\begin{aligned} \ln|\mu_1(\theta)| = \beta D \tilde{\mu}_0 \left[\frac{1}{\tilde{C}_2} (\Delta_1 J_3(\theta) + \Delta_2 J_2(\theta) + \Delta_3 J_1(\theta)) + \right. \\ \left. + \frac{2}{\tilde{C}_2} (\tilde{\Delta}_1 J_3(\theta) + \tilde{\Delta}_2 J_2(\theta) + \tilde{\Delta}_3 J_2(\theta) + \tilde{\Delta}_4 J_1(\theta)) \right], \end{aligned} \quad (37)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{\Delta}_1 = \int_0^1 \tilde{\psi}_0''(\xi) \tilde{\psi}_1''(\xi) d\xi; \quad \tilde{\Delta}_2 = \int_0^1 (\tilde{\psi}_0''(\xi) \cdot \tilde{v}_1'(\xi)) d\xi; \\ \tilde{\Delta}_3 = \int_0^1 (\tilde{\psi}_1''(\xi) \cdot \tilde{v}_0'(\xi)) d\xi; \quad \tilde{\Delta}_4 = \int_0^1 \tilde{v}_0'(\xi) \cdot \tilde{v}_1'(\xi) d\xi. \end{aligned} \quad (38)$$

Подставляя значения (38) в (37), заменим полученную функцию $\mu_1(\theta)$ ее усредненным интегральным значением:

$$\tilde{\mu}_1 = 1 - e^{2\pi^2 D \tilde{\mu}_0 \beta \left[\frac{7+2\eta^2}{2+\eta^2} + \frac{2+\eta^2}{1-\eta^2} \right]}. \quad (39)$$

Тогда для p_1 окончательно получаем:

$$p_1 = j(\tilde{\mu}_1 + M\tilde{\mu}_0) \left[\frac{36\eta^2}{(2+\eta^2)\sqrt{1-\eta^2}} \arctg \left(\sqrt{\frac{1-\eta}{1+\eta}} \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right) - \frac{6\eta \sin \theta}{(2+\eta^2)(1-\eta \cos \theta)} - \frac{6 \sin \theta}{(2+\eta^2)(1-\eta \cos \theta)^2} \right]. \quad (40)$$



Результаты исследований и их обсуждение

Перейдем к определению основных рабочих характеристик подшипника.

Для составляющей вектора поддерживающей силы и силы трения при учете (12), (14), (26) и (40) получим:

$$R_x = \frac{\mu_0 \Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p - \frac{P_g}{P^*} + K p_1 \right) \cos \theta d\theta = 0,$$
$$R_y = \frac{\mu_0 \Omega r_0^3}{\delta^2} \int_0^{2\pi} \left(p + K p_1 - \frac{P_g}{P^*} \right) \sin \theta d\theta = \frac{6\mu_0 \Omega r_0^3 \pi (\tilde{\mu}_0 + K(\tilde{\mu}_1 + M\tilde{\mu}_0)) (\eta(1-\eta^2) + 1)}{\delta^2 (2+\eta^2) \sqrt{(1-\eta^2)^3}};$$
$$L_{тр} = \frac{\mu_0 \Omega r_0^2}{\delta} \int_0^{2\pi} \left[\frac{\partial v_0}{\partial r} \right]_{r=0} + K \left[\frac{\partial v_1}{\partial r} \right]_{r=0} d\theta = \frac{4\pi\mu_0 \Omega r_0^3}{\delta} \left(\frac{-(\tilde{\mu}_0 + 2KM\tilde{\mu}_1)}{\sqrt{1-\eta^2}} + \frac{3(1-\eta^2)(\tilde{\mu}_0 + KM\tilde{\mu}_1)}{(2+\eta^2)\sqrt{(1-\eta^2)^3}} \right). \quad (41)$$

При проведении проверочных расчетов полученных теоретических моделей использовались следующие значения:

$$\begin{aligned} \mu_0 &= 0,21 \text{ Нс/м}^2; \eta = 0,3 \dots 1 \text{ м}; r_0 = 0,019995 \dots 0,0493 \text{ м}; \\ \Omega &= 100 \dots 1800 \text{ с}^{-1}; \delta = 0,05 \cdot 10^{-3} \dots 0,07 \cdot 10^{-3}; K = 0,00052 \dots 0,0000022; \\ P_g &= 0,2 \text{ МПа}; \alpha = 0,1; L' = 35,33 \dots 38,1 \text{ Н/м}^2; M = 0,16 \dots 25,6. \end{aligned}$$

По результатам численных расчетов построены графики, приведенные на рис. 2, 3.

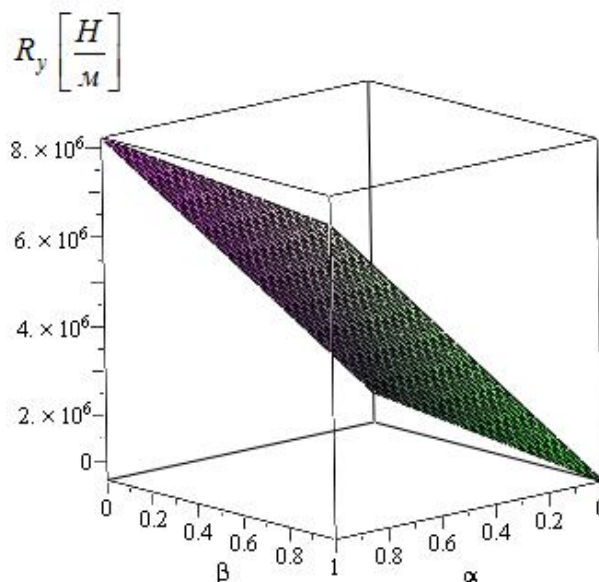


Рис. 2. Зависимость компонента поддерживающей силы (R_y) от параметра α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от давления и параметра β , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от температуры

Fig. 2. Dependence of the supporting force (R_y) component on the parameter α characterizing the dependence of lubricant viscosity on the pressure and parameter β characterizing the dependence of lubricant viscosity on temperature

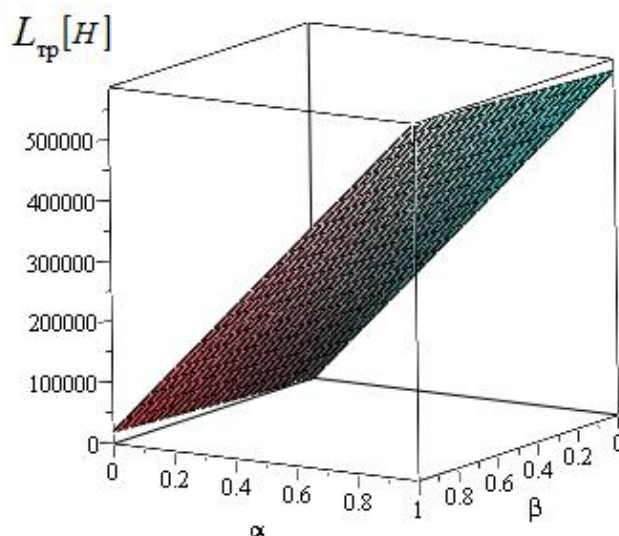


Рис. 3. Зависимость силы трения $L_{тр}$ от параметров: α , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от давления, и от параметра β , характеризующего зависимость вязкости смазочного материала от температуры

Fig. 3. Dependence of the friction force $L_{тр}$ on parameters: α characterizing the dependence of lubricant viscosity on the pressure and on the parameter β characterizing the dependence of lubricant viscosity on temperature

Результаты численного анализа полученных аналитических выражений показывают, что нагрузочная способность радиальных подшипников скольжения, смазываемых расплавом в турбулентном режиме трения, зависит от параметров: α , обусловленного зависимостью вязкости смазочного материала от давления, и β , обусловленного зависимостью вязкости смазочного материала от температуры.

Заключение

1. Получена уточненная расчетная модель радиального подшипника скольжения, который работает в условиях гидродинамического смазывания расплавом легкоплавкого покрытия при учете одновременной зависимости вязкости смазочного материала от давления и температуры.

2. Показан значительный вклад конструктивного параметра K , обусловленного расплавом, на основные рабочие характеристики подшипника. С увеличением конструктивного параметра K коэффициент трения уменьшается на 50%, а несущая способность увеличивается на 18%.

Результаты численного анализа полученных теоретических исследований показывают, что опоры скольжения, работающие на расплаве легкоплавкого покрытия, обладают аномально низким коэффициентом трения (зависимость коэффициента трения от параметра, обусловленного расплавом, близка линейной). Полученные результаты могут быть использованы в машиностроении, авиастроении, приборостроении для создания деталей и узлов машин, в которых затруднена подача смазочного материала.

Публикация осуществлена в рамках реализации гранта ОАО «РЖД» 2210370/22.12.2016 на развитие научно-педагогических школ в области железнодорожного транспорта.



Библиографический список

1. Кропачев Д.Ю., Гришин А.А., Масло А.Д. Способы оперативного измерения температуры расплава металлов для нужд машиностроительных предприятий // *Литье и металлургия*. 2012. № 3 (66). С. 126–127.
2. Уилсон Р. Смазка с расплавом // *Проблемы трения и смазки*. 1976. № 1. С. 19.
3. Беретта А., Ниро Д., Сильвестри Ф. Подшипники скольжения, смазываемые собственным расплавом или продуктом сублимации // *Труды Американского общества инженеров-механиков*. 1992. № 1. С. 86–90.
4. Котельническая Л.И., Демидова Н.Н. Расчет радиальных подшипников с эффективной работой на смазке с расплавом в турбулентном режиме // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2002. № 2. С. 18–23.
5. Приходько В.М., Котельническая Л.И. Математическая модель гидродинамической смазки при плавлении опорной поверхности радиального подшипника // *Трение и износ*. 2001. Т. 22. № 6. С. 606–608.
6. Задорожная Е.А., Мухортов И.В., Леванов И.Г. Применение неньютоновских моделей смазочных жидкостей при расчете сложнонагруженных узлов трения поршневых и роторных машин // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. 2011. № 7. С. 22–30.
7. Прокопьев В.Н., Бояршинова А.К., Задорожная Е.А. Динамика сложнонагруженного подшипника, смазываемого неньютоновской жидкостью // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2005. № 6. С. 108–114.
8. Прокопьев В.Н., Задорожная Е.А., Караваев В.Г., Леанов И.Г. Совершенствование методики расчета сложнонагруженных подшипников скольжения, смазываемых неньютоновскими маслами // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2010. № 1. С. 63–67.
9. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Working Out of an Analytical Model of a Radial Bearing Taking into Account Dependence of Viscous Characteristics of Micropolar Lubrication on Pressure and Temperature // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 15. P. 4840–4846.
10. Lagunova E.O. Simulation Model of Radial Bearing, Taking into Account the Dependence of Viscosity Characteristics of Micro-Polar Lubricant Material on Temperature // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 12. P. 3346–3352.
11. Lagunova E.O. Computation model of radial bearing taking into account the dependence of the viscosity of lubricant on pressure and temperature // *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2017. Vol. 13. No. 7. P. 3531–3542.
12. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала // *Вестник РГУПС*. 2017. № 2 (66). С. 129–135.
13. Василенко В.В., Лагунова Е.О., Мукутадзе М.А. Гидродинамический расчет радиального подшипника, смазываемого расплавом легкоплавкого покрытия при наличии смазочного материала [Электронный ресурс] // *Научное ведение: интернет-журнал*. 2017. Т. 9. № 5. URL: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf> (25.04.2018).
14. Ахвердиев К.С., Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Клиновидные опоры скольжения, работающие на микрополярном смазочном материале, обусловленные расплавом // *Вестник РГУПС*. 2017. № 3 (67). С. 8–15.
15. Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Solop K.S. Working Out of an Analytical Model of an Axial Bearing Taking into Account Dependence of Viscous Characteristics of Micropolar Lubrication on Pressure and Temperature // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 14. P. 4644–4650.
16. Ахвердиев К.С., Лагунова Е.О., Василенко В.В. Расчетная модель радиального подшипника, смазываемого расплавом, с учетом зависимости вязкости от давления // *Вестник ДГТУ*. 2017. № 3 (90). С. 27–37.
17. Lagunova E.O. Wedge-Shaped Sliding Supports Operating on Viscoelastic Lubricant Material Due to the Melt, Taking Into Account the Dependence of Viscosity and Shear Modulus on Pressure // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 19. P. 9120–9127.
18. Lagunova E.O. Radial Plain Bearings Operating on Viscoelastic Lubricant Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of the Viscosity of the Lubricant and the Shear Modulus on the Pressure // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 19. P. 9128–9137.
19. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Prikhodko V.M. Calculation Model of the Radial Bearing, Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of Viscosity on Pressure // *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017. Vol. 12. No. 19. P. 9138–9148.
20. Лагунова Е.О. Клиновидные опоры скольжения, работающие на электропроводящем смазочном материале, обусловленные расплавом // *Международное научное издание «Современные фундаментальные и прикладные исследования»*. 2017. № 4 (27). Ч. 1. С. 20–31.

References

1. Kropachev D.Yu., Grishin A.A., Maslo A.D. Methods of on-site measurement of metal melt temperature for the needs of machine-building enterprises. *Lit'e i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy]. 2012, no. 3 (66), pp. 126–127. (In Russian).
2. Uilson R. Lubricant and melt. *Problemy treniya i smazki* [Journal of Lubrication Technology]. 1976, no. 1, p. 19. (In Russian).
3. Beretta A., Niro D., Sil'vestri F. Slide bearings lubricated by own melt or sublimation product // *Trudy Amerikanskogo obshchestva inzhenerov-mekhanikov* [The ASME Journal]. 1992, no. 1, pp. 86–90.



4. Kotelnickaya L.I., Demidova N.N. Calculation of radial bearings effectively operating on lubricant with melt in turbulent mode. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya* [Vestnik RGUPS. Scientific and Technical Journal]. 2002, no. 2, pp. 18–23. (In Russian).
5. Prihod'ko V.M., Kotelnickaya L.I. Mathematical model of hydrodynamic lubricant when melting the radial bearing surface area. *Trenie i iznos* [Friction and Wear]. 2001, vol. 22, no. 6, pp. 606–608. (In Russian).
6. Zadorozhnaya E.A., Muhortov I.V., Levanov I.G. Application of non-Newtonian models of lubrication fluids when calculating complex loaded friction assembly of piston and rotor-type machines. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmah* [Friction and Lubrication in Machines and Mechanisms]. 2011, no. 7, pp. 22–30. (In Russian).
7. Prokop'ev V.N., Boyarshinova A.K., Zadorozhnaya E.A. Dynamics of complex loaded bearing lubricated by non-Newtonian liquid. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2005, no. 6, pp. 108–114. (In Russian).
8. Prokop'ev V.N., Zadorozhnaya E.A., Karavaev V.G., Leanov I.G. Improvement of the computation procedure for complex-loaded sleeve bearings lubricated with non-Newtonian oils. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin* [Journal of Machinery Manufacture and Reliability]. 2010, no. 1, pp. 63–67. (In Russian).
9. Akhverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Solop K.S. Working Out of an Analytical Model of a Radial Bearing Taking into Account Dependence of Viscous Characteristics of Micropolar Lubrication on Pressure and Temperature. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 15, pp. 4840–4846.
10. Lagunova E.O. Simulation Model of Radial Bearing, Taking into Account the Dependence of Viscosity Characteristics of Micro-Polar Lubricant Material on Temperature. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 12, pp. 3346–3352.
11. Lagunova E.O. Computation model of radial bearing taking into account the dependence of the viscosity of lubricant on pressure and temperature. *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2017, vol. 13, no. 7, pp. 3531–3542.
12. Ahverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Hydrodynamic calculation of the radial bearing with lubricated melt fusible coating in the presence of lubricant. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2017, no. 2 (66), pp. 129–135. (In Russian).
13. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A. Hydrodynamic calculation of the radial bearing lubricated by the melt of low-melting coating in the presence of a lubricant. *Naukovedenie: internet-zhurnal* [Online journal "Science Studies"]. 2017, vol. 9, no. 5. Available at: <https://naukovedenie.ru/PDF/20TVN517.pdf> (accessed 25 April 2018).
14. Ahverdiev K.S., Mukutadze M.A., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Wedge-shaped support of sliding using micropolar lubricant caused by fusion. *Vestnik RGUPS* [Bulletin of Rostov State Transport University]. 2017, no. 3 (67), pp. 8–15. (In Russian).
15. Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Solop K.S. Working Out of an Analytical Model of an Axial Bearing Taking into Account Dependence of Viscous Characteristics of Micropolar Lubrication on Pressure and Temperature. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 14, pp. 4644–4650.
16. Ahverdiev K.S., Lagunova E.O., Vasilenko V.V. Design model of radial melt-lubricated bearing with account of pressure-viscosity ratio. *Vestnik DGTU* [Vestnik of DSTU]. 2017, no. 3 (90), pp. 27–37. (In Russian).
17. Lagunova E.O. Wedge-Shaped Sliding Supports Operating on Viscoelastic Lubricant Material Due to the Melt, Taking Into Account the Dependence of Viscosity and Shear Modulus on Pressure. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 19, pp. 9120–9127.
18. Lagunova E.O. Radial Plain Bearings Operating on Viscoelastic Lubricant Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of the Viscosity of the Lubricant and the Shear Modulus on the Pressure. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 19, pp. 9128–9137.
19. Vasilenko V.V., Lagunova E.O., Mukutadze M.A., Prikhodko V.M. Calculation Model of the Radial Bearing, Caused by the Melt, Taking into Account the Dependence of Viscosity on Pressure. *International Journal of Applied Engineering Research*. 2017, vol. 12, no. 19, pp. 9138–9148.
20. Lagunova E.O. Wedge-shaped sliding supports working on electroconductive lubricant caused by melt. *Mezhdunarodnoye nauchnoye izdanie "Sovremennye fundamental'nye i prikladnye issledovaniya"* [International scientific periodical "Modern Fundamental and Applied Researches"]. 2017, no. 4 (27), part 1, pp. 20–31. (In Russian).

Критерии авторства

Лагунова Е.О. провела исследование, подготовила статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Lagunova E.O. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Лагунова Е.О. заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

Lagunova E.O. declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9.048.6.04

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-33-40>

УВЕЛИЧЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© Г.В. Серга¹, А.Ю. Марченко², Э.А. Хвостик³

Кубанский государственный аграрный университет им. И.Т. Трубилина,
350044, Российская Федерация, г. Краснодар, ул. Калинина, 13.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Рассмотреть возможность повышения технологических ресурсов и эффективности вибрационной обработки деталей машиностроительных производств путем создания рабочих органов станков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки (ОЗиУО) деталей, обеспечивающих движение обрабатываемых деталей с большой амплитудой. Показать эффективность станков для ОЗиУО с рабочими органами в виде винтовых роторов и их технологические возможности, а также разработать методику расчета привода станков на базе винтовых роторов. **МЕТОДЫ.** Аналитическое исследование с целью создания методики расчета привода станка для отделочно-зачистной обработки на базе винтовых роторов выполнялось с использованием методов теоретической механики, геометрии и математического анализа. Экспериментальное исследование проводилось с целью подтверждения эффективности ОЗиУО в винтовых роторах. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Созданы рабочие органы станков, обеспечивающие не только движение массы обрабатываемых деталей с большой амплитудой движения, но и расширение технологических возможностей процесса обработки за счет увеличения диапазона массы, размера и конфигурации обрабатываемых деталей. Предложена технология и комплект оборудования, позволяющие осуществлять колебания массы загрузки (обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред) с амплитудой от 10 до 1000 мм и выше. **ВЫВОДЫ.** Предложена типовая схема станка для ОЗиУО деталей машиностроительного производства и методика расчета привода станков с рабочими органами в виде винтовых роторов. На основе общего принципа создана классификация винтовых роторов, что позволяет прогнозировать разработку винтовых роторов новых конструкций.

Ключевые слова: винтовой ротор, тетраэдр, ствол винтового ротора, обрабатываемые детали, колебания большой амплитуды, привод.

Информация о статье. Дата поступления 10 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 11 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Серга Г.В., Марченко А.Ю., Хвостик Э.А. Увеличение технологических возможностей и повышение эффективности вибрационной обработки деталей в машиностроительном производстве // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 33–40. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-33-40

INCREASING TECHNOLOGICAL CAPABILITIES AND IMPROVING EFFICIENCY OF PART VIBRATION TREATMENT IN MACHINERY PRODUCTION

G.V. Serga, A.Yu. Marchenko, E.A. Khvostik

¹Серга Георгий Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры начертательной геометрии и графики, e-mail: Serga.georgy@yandex.ru

Georgiy V. Serga, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Descriptive Geometry and Graphic, e-mail: Serga.georgy@yandex.ru

²Марченко Алексей Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры начертательной геометрии и графики, e-mail: MarzenkoA@yandex.ru

Aleksey Yu. Marchenko, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Descriptive Geometry and Graphics, e-mail: MarzenkoA@yandex.ru

³Хвостик Эдуард Андреевич, магистрант, e-mail: e.a.hvostik@gmail.com
Eduard A. Khvostik, Master's degree student, e-mail: e.a.hvostik@gmail.com



I.T. Trubilin Kuban State Agrarian University,
13, Kalinin St., Krasnodar, 350044, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the article is to consider the possibility to improve technological resources and efficiency of vibration treatment of parts in machine-building industries by creating the working elements of machine-tools for finishing-grinding and strengthening treatment of parts, which ensure the movement of the machined parts with a large amplitude; to demonstrate the efficiency of the machine-tools with the working elements in the form of helical rotors for finishing-grinding and strengthening treatment of parts and their technological capabilities as well as to develop a methodology for calculating the machine tools drive based on helical rotors. **METHODS.** The analytical study aimed at creating a technique for calculating the machine-tool drive for finishing-grinding and strengthening treatment based on helical rotors is performed using the methods of theoretical mechanics, geometry and mathematical analysis. The experimental study is carried out in order to prove the efficiency of finishing-grinding and strengthening treatment in helical rotors. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** We have created the working elements of machine tools that provide the machined part weight movement with the large motion amplitude as well as extend technological capabilities of the machining process by increasing the range of weight, size and configuration of the machined parts. The technology and the set of equipment allowing to carry out the fluctuations of the loading weight (machined parts and working media particles) with the amplitude from 10 to 1000 mm and higher have been proposed. **CONCLUSIONS.** A typical diagram of the machine-tool for finishing-grinding and strengthening treatment of parts in machine-building production is proposed as well as the technique for calculating the drive of machine-tools with the working elements in the form of helical rotors. A classification of helical rotors has been created on the basis of a general principle that allows to predict the development of helical rotors of new designs.

Keywords: helical rotor, tetrahedron, helical rotor body, machined parts, large amplitude oscillations, drive

Information about the article. Received April 10, 2018; accepted for publication June 11, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Serga G.V., Marchenko A.Yu., Khvostik E.A. Increasing technological capabilities and improving efficiency of part vibration treatment in machinery production. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 33–40. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-33-40 (In Russian).

Введение

Большие технологические возможности вибрационного метода обработки поверхности деталей создают благоприятные предпосылки для его использования на очистных, шлифовально-полировальных и упрочняющих операциях. Под действием вибрации детали и шлифовальный материал переходят в относительное перемещение, совершая два вида движений: колебания и медленное вращение массива загрузки (циркуляционное движение). В процессе обработки детали переориентируются и проходят различные зоны рабочей камеры станка, что обеспечивает достаточно равномерную обработку всех поверхностей.

Интенсивность виброобработки зависит от таких основных факторов, как объем рабочей камеры и степень ее заполнения, характеристики и размер гранул шлифовального материала, длительность цикла обработки, а также от частоты и амплитуды колебаний рабочей камеры (чаще всего амплитуда составляет не более 4–8 мм). Поэтому для увеличения эффективности процесса необходимо усложнить и придать разнообразные формы движению деталей в рабочих органах станков, а также увеличить его амплитуду путем совершенствования геометрии рабочих органов станков методами начертательной геометрии и инженерной графики.

Разработка станка на базе винтовых роторов в технологии отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей

Основываясь на идеологии академика Л.Н. Кошкина, авторами настоящей статьи предлагается технология и комплект

оборудования, позволяющие осуществлять колебания масс загрузки (обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред) с амплиту-



дой от 10 до 1000 мм и выше [1–3]. Такая возможность реализуется за счет оформления наружных поверхностей рабочих органов плоскими или криволинейными элементами, что позволяет не только создавать низкочастотные колебания масс загрузки с большой амплитудой, но и совмещать транспортные и технологические функции, т.е. осуществлять процесс отделочно-зачистной и упрочняющей обработки (ОЗиУО) деталей непрерывным потоком во время их транспортирования от загрузки к выгрузке.

Станок для ОЗиУО деталей машиностроительного производства включает (рис. 1): станину 1, на которой закреплен привод 2, роликовые опоры 3, винтовой ротор 4 с ободами 5 и 6, два вала 7, на которых закреплены роликовые опоры 3, загрузочную воронку 8 и емкость 9, в которую через торцевое отверстие 10 винтового ротора 4 выгружаются обработанные детали и частицы рабочих сред [4–7].

Исследование факторов, влияющих на эффективность упрочнения в станках для ОЗиУО деталей и улучшение качества поверхностного слоя деталей, показало (рис. 2):

- с увеличением твердости обрабатываемого материала детали съем металла уменьшается;
- увеличение грануляции (размеров) части рабочих сред повышает съем металла и скорость протекания процессов;
- с увеличением веса детали увеличивается съем металла;
- с увеличением продолжительности обработки съем металла увеличивается;
- производительность съема металла растет с увеличением частоты вращения винтовых роторов до предельной скорости, свыше которой детали и рабочая среда «прилипают», т.е. начинают вращаться вместе со стенками винтовых роторов.

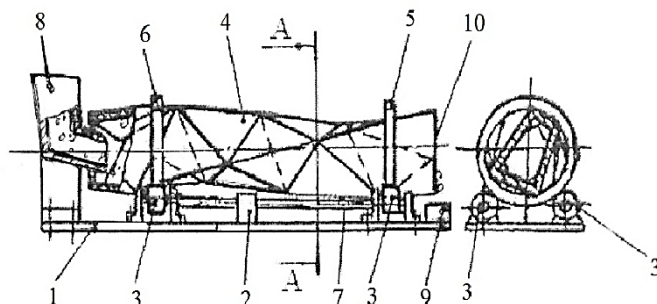


Рис. 1. Типовая схема станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей машиностроительного производства

Fig. 1. Typical diagram of the machine-tool for finishing-grinding and hardening treatment of parts in machinery production

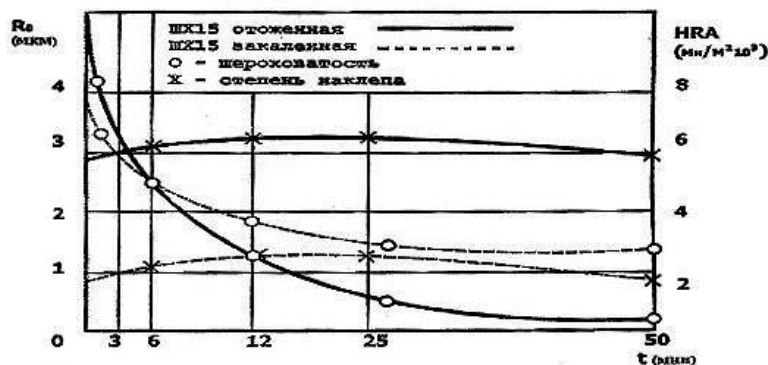


Рис. 2. Исследование процессов изменения шероховатости и микротвердости поверхности деталей при ОЗиУО в винтовых роторах
Fig. 2. Study of the variation processes in part surface roughness and microhardness under finishing-grinding and strengthening treatment in helical rotors



Разработка методики расчета привода станков на базе винтовых роторов

Как известно, при проектировании станков для ОЗиУО деталей необходимо определить оптимальную скорость вращения винтовых роторов и мощность электродвигателя привода. По результатам проведенных исследований даны рекомендации по выбору скорости вращения винтовых роторов. Масса загрузки обрабатываемых деталей и частиц рабочих сред внутренней полости винтового ротора, масса его корпуса, масса двух ободов, жестко закрепленных по его наружному диаметру, несимметричны оси вращения в сечении плоскости, перпендикулярной оси вращения винтового ротора. Эта несимметричность приводит к необходимости увеличения мощности электродвигателей привода станков для ОЗиУО, что и предопределяет необходимость создания методики расчета привода станков для ОЗиУО на базе винтовых роторов. При этом загрузка внутренней полости винтового ротора определяется коэффициентами заполнения K_y , которые исследованы нами ранее. Получены рекомендации по его применению в расчетах при проектировании станков для ОЗиУО. Например, винтовой ротор смонтирован из пустотелых тетраэдров (равносторонних треугольных пустотелых пирамид). Количество тетраэдров определяется требуемыми конструктивно-технологическими параметрами процесса (ОЗиУО), а именно, длиной винтового ротора L_p и его наружным диаметром D_p (рис. 3).

Авторами предложена конструкция станка для ОЗиУО и упрочнения поверхности деталей, обеспечивающая повышение надежности деталей машины, а также разработана техническая документация для их серийного промышленного изготовления.

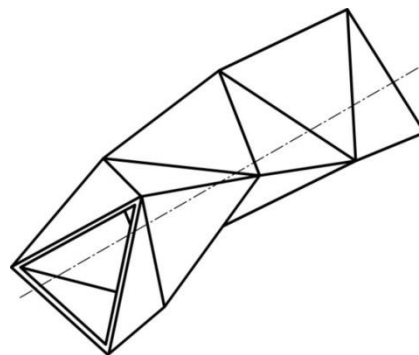


Рис. 3. Схема винтового ротора
Fig. 3. Diagram of a helical rotor

Ранее было рассчитано, что $D_p = 1,16 \cdot a$, где a – боковая сторона тетраэдра.

Ствол релятивного винтового ротора состоит из отдельных правильных тетраэдров, соединенных между собой гранями (рис. 4). Вершины тетраэдров такого ствола образуют трехходовую цилиндрическую винтовую линию, а ребра тетраэдров являются секущими этой винтовой линии (рис. 5). Направление завинчивания можно выполнить как левым, так и правым.

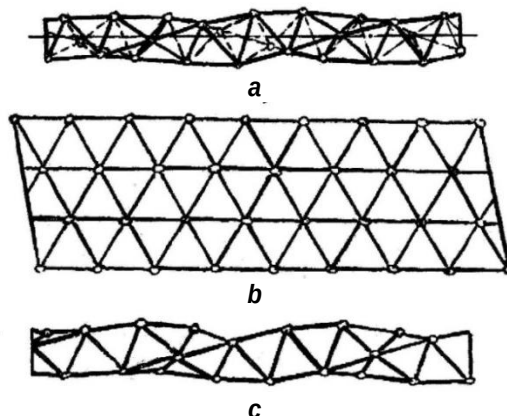


Рис. 4. Схема ствола релятивного винтового ротора:
а – вид спереди; б – развертка боковой поверхности; в – вид сбоку

Fig. 4. Diagram of relative helical rotor body: a – front elevation; b – lateral surface display; c – side view

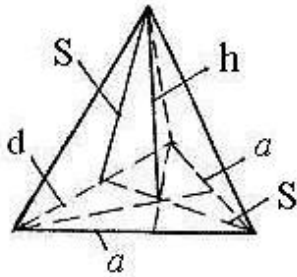


Рис. 5. Схема тетраэдра
Fig. 5. Tetrahedron diagram

Объем тетраэдра V можно определить как

$$V = \frac{1}{3} \cdot B \cdot h, \quad (1)$$

где B – площадь основания, равная

$$B = \frac{a^2}{4} \cdot \sqrt{3}; \quad (2)$$

h – высота тетраэдра, рассчитанная как

$$h = \sqrt{S^2 - r^2}. \quad (3)$$

Здесь S – апофема; r – радиус вписанной в сторону тетраэдра окружности:

$$S = \frac{a}{2} \cdot \sqrt{3}; r = \frac{a}{6} \cdot \sqrt{3} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} h &= \sqrt{\left(\frac{a}{2} \cdot \sqrt{3}\right)^2 - \left(\frac{a}{6} \cdot \sqrt{3}\right)^2} = \sqrt{\frac{a^2 \cdot 3}{4} - \frac{a^2 \cdot 3}{36}} = \\ &= \sqrt{\frac{3}{4} \cdot a^2 - \frac{1}{12} \cdot a^2} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot a^2} = \frac{a \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} \end{aligned} \quad (5)$$

С учетом выражений (1)–(5) получим зависимость для определения объема внутренней полости одного тетраэдра:

$$V_m = \frac{1}{3} \cdot \frac{a \cdot \sqrt{3}}{4} \cdot \frac{a \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}} = \frac{a^3 \cdot \sqrt{2}}{12} = 0,11785 a^3. \quad (6)$$

Если принять по внутреннему ребру пирамиды длину стороны тетраэдра, например, $a \approx 0,4$ м, то объем винтового ротора будет равен:

$$\begin{aligned} V &= V_m = 0,0075424 \cdot \kappa = \\ &= 0,0075424 \cdot 20 = 0,150848 \text{ м}^3, \end{aligned} \quad (7)$$

где κ – количество пустотелых тетраэдров, из которых смонтирован винтовой ротор ($\kappa = 20$).

Например, задано обеспечить галтовку деталей, изготовленных из стали Ст3. Средний удельный вес стали $j_{cp} = 7800 \text{ кг/м}^3$.

Из условия заполнения $K_V = 0,55$ объема винтового ротора массу деталей, находящихся внутри винтового ротора, можно определить с помощью зависимости

$$m_1 = 0,55 \cdot V \cdot \rho, \quad (8)$$

где плотность ρ соответствует среднему удельному весу деталей, заполняющих винтовой ротор:

$$\begin{aligned} m_1 &= 0,55 \cdot 0,150948 \text{ м}^3 \cdot 7800 \text{ кг/м}^3 = \\ &= 647,138 \text{ кг} \approx 650 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Масса винтового ротора, точнее, масса его ствола, определяется путем вычисления площади винтового ротора по периметру (рис. 6).

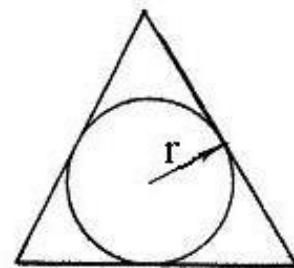


Рис. 6. Боковая сторона тетраэдра со вписанной окружностью радиусом r
Fig. 6. Lateral side of the tetrahedron with the inscribed circle of r radius

Так как площадь одной стороны тетраэдра S_m определяется с помощью зависимости $S_m = a^2 \sqrt{3} / 4 = 0,433 \cdot a^2 = 0,0527 \text{ м}^2$, то площадь всей боковой поверхности ствола S_c винтового ротора будет равна:

$$S_c = 0,0527 \cdot 40 = 2,108 \text{ м}^2.$$

Принимая толщину стенок $0,005$ м, масса ствола m_2 винтового ротора (сталь Ст3) будет равна:



$$m_2 = 2,108 \text{ м}^2 \cdot 0,005 \text{ м} \cdot 7800 \text{ кг/м}^3 = 82,2 \text{ кг} \approx 83 \text{ кг}.$$

Масса винтового ротора в сборе включает:

- массу деталей, находящихся внутри винтового ротора – $m_1 \approx 650 \text{ кг}$;
- массу ствола винтового ротора – $m_2 \approx 83 \text{ кг}$;
- массу двух ободов, жестко закрепленных по наружному диаметру винтового ротора.

Так как диаметр винтового ствола винтового ротора определяется с помощью зависимости $D = 1,16 \cdot a = 0,464 \text{ м}$, то этот размер соответствует внутреннему диаметру ободов 5 и 6 (см. рис. 1). Наружный диаметр ободов из конструктивных соображений принимаем равным 500 мм. При толщине обода 0,015 м объем одного обода равен $0,001635 \text{ м}^3$, а масса одного обода $m_3 = 13 \text{ кг}$.

Масса винтового ротора в сборе включает:

- массу обрабатываемых деталей, находящихся внутри винтового ротора – $m_1 \approx 650 \text{ кг}$;
- массу ствола винтового ротора – $m_2 \approx 83 \text{ кг}$;
- массу двух ободов, жестко закрепленных по наружному диаметру винтового ротора – $2m_3 = 26 \text{ кг}$.

Поэтому, при условии равномерного распределения обрабатываемых деталей, общая масса винтового ротора в сборе будет равна:

$$m = m_1 + m_2 + 2m_3 = 650 + 83 + 26 = 759 \text{ кг} \approx 760 \text{ кг}.$$

Силу притяжения винтового ротора к опорным роликам при условии равномерного распределения в нем обрабатываемых деталей (см. рис. 6) можно определить как

$$F_N = \frac{K \cdot F_t}{f} = \frac{K \cdot T_1 (i+1)}{f \cdot D};$$

$$F_N = G \cdot \cos \alpha, \quad (10)$$

где $G = 760 \cdot 9,81 = 7455,6 \text{ Н}$.

Фактически сила притяжения будет равна:

$$F_N = 7455,6 \cdot \cos 45^\circ = 7455,6 \cdot 0,52532 \approx 3917 \text{ Н}.$$

Отсюда определяем вращающий момент M на валу опорных роликов:

$$M = \frac{F_N \cdot f \cdot D}{K \cdot u} = \frac{3917 \cdot 0,21 \cdot 0,51}{1,3 \cdot 2,5} \approx \frac{419,5}{3,25} \approx 129 \text{ Нм}, \quad (11)$$

где f – коэффициент трения ($f = 0,21$); D – диаметр ведущего катка ($D = 0,2 \text{ м}$); K – коэффициент нагрузки, запас сцепления ($K = 1,25\text{--}1,5$, принимаем $K=1,3$); u – передаточное число от барабана к опорным роликам ($u = 2,5$).

При $n_6 = 70 \text{ об./мин}$ с учетом, что $u = 2,5$, опорные ролики 3 (см. рис. 1) должны вращаться со скоростью $n = 175 \text{ об./мин}$. Тогда:

$$\omega = \frac{\pi \cdot n}{30} = \frac{3,14 \cdot 175}{30} = 18,3 \left(\frac{1}{\text{с}} \right); \quad (12)$$

$$\eta_{06} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 = 0,63;$$

$$\eta_1 = \eta_3 = 0,9;$$

$$\eta_2 = 0,7.$$

Передачу крутящего момента M на вал опорных роликов 3 осуществляют редуктор и электродвигатель при его двойном вращении (одновременно он вращает опорные ролики и винтовой ротор общей массой 760 кг). Мощность электродвигателя N при симметричном расположении загрузки обрабатываемых деталей можно определить с помощью зависимости:

$$N = \frac{M \cdot \omega}{\eta_{06}} = \frac{129 \cdot 18,3}{0,63} = 3747,14 \text{ Вт}. \quad (13)$$

В действительности масса загрузки обрабатываемых деталей расположена в винтовом роторе несимметрично оси вращения. Поэтому можно предположить, что



рассчитанной мощности электродвигателя для работы станка для ОЗиУО деталей будет недостаточно. Для проверки этого предположения рассмотрим сечение винтового ротора плоскостью, перпендикулярной оси вращения (рис. 7).

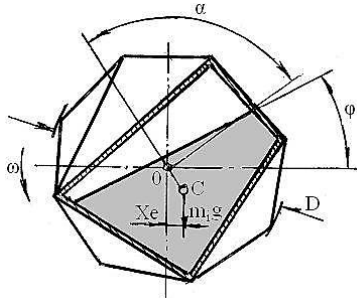


Рис. 7. Схема к расчету станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей
Fig. 7. Diagram for calculating the machine-tool for finishing-grinding and strengthening treatment of parts

На рис. 7 обозначены величины, применяемые при расчетах: α – половина угла сегмента свободного объема винтового ротора; $O (=O)$ – центр тяжести загрузки винтового ротора; m_1 – масса загрузки обрабатываемых деталей.

Радиус ОС обозначим через e и определим его значение по формуле

$$e = 0,424 \cdot (1 - K_v) \cdot D = 0,424 \cdot 0,45 \cdot 0,5 = 0,095 \text{ м.} \quad (14)$$

Момент, создаваемый относительно оси вращения винтового ротора несимметричной загрузкой обрабатываемых деталей, определяется зависимостью:

$$M_1 = X_e \cdot m_1 \cdot g = 0,055 \cdot 650 \cdot 9,81 = 350,7 \text{ Н м,} \quad (15)$$

где m_1 – масса обрабатываемых деталей, находящихся внутри винтового ротора; X_e – проекция отрезка ОС на горизонтальную ось, определяемая зависимостью

$$x_e = e \cdot \sin \varphi = 0,095 \cdot 0,5736 = 0,055 \text{ м.} \quad (16)$$

Зная момент M_1 , создаваемый загрузкой винтового ротора, можно определить мощность электродвигателя, затрачиваемую на преодоление момента, создаваемого несимметричной загрузкой обрабатываемых деталей относительно оси вращения винтового ротора:

$$N_1 = \frac{M_1 \cdot \omega}{\eta_{об}} = \frac{350,7 \cdot 18,3}{0,63} = 10187 \text{ Вт.} \quad (17)$$

Таким образом, суммируя мощности электродвигателя для вращения винтового ротора от воздействия симметричной и несимметричной загрузки, получим величину суммарной мощности электродвигателя станка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей на базе винтового ротора (рис. 8):

$$N_{общ.} = N + N_1 = 3747,14 + 10187 \text{ Вт} \approx 13,935 \text{ кВт.} \quad (18)$$

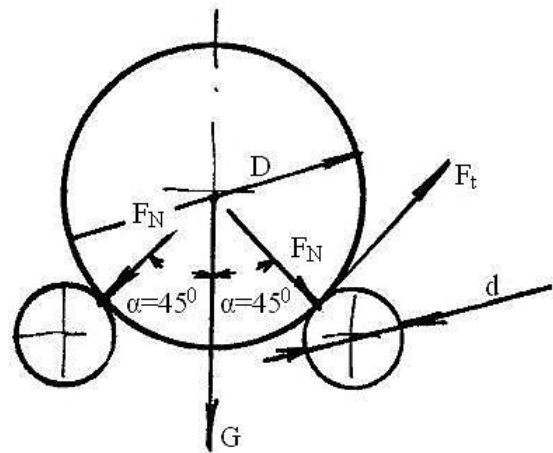


Рис. 8. Схема действия сил, возникающих при вращении винтового ротора
Fig. 8. Diagram of forces arising under helical rotor rotation

Выбираем по справочнику ближайший по ряду электродвигатель, например, 5АИ160С4, имеющий параметры: $N = 15 \text{ кВт}$, $n = 1500 \text{ об./мин.}$

Выводы

В результате проведенных исследований авторами предложены:

– пути увеличения технологических возможностей и повышения эффективно-



сти вибрационной обработки деталей в станках путем использования рабочих органов в форме винтовых роторов;

– методика расчета привода конструкции станков для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки поверхности де-

талей на базе винтовых роторов.

Кроме того, создана классификация винтовых роторов на основе единого принципа, что позволяет прогнозировать разработку винтовых роторов новых конструкций.

Библиографический список

1. Кошкин Л. Н. Роторные и роторно-конвейерные линии. М.: Машиностроение, 1986. 319 с.
2. Серга Г.В., Лебедев В.А. Внедрение идеологии Л.Н. Кошкина в виброупрочняющие технологии на примере винтовых роторов // Вестник Рыбинской государственной технической академии им П.А. Соловьёва. 2017. № 2 (41). С. 126–132.
3. Серга Г.В., Лебедев В.А., Белокур К.А., Яковлев Д.Я. Повышение производительности технологических систем отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей на основе винтовых роторов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 4 (136). С. 16–19.
4. Пат. 2549793, Российская Федерация МПК В24В 31/02 (2006.01). Станок для абразивной обработки деталей с отделением обработанных деталей от абразивных гранул и отходов обработки / Г.В. Серга, С.М. Резниченко; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет. № 2013144078/02; заявл. 01.10.2013; опубл.

27.04.2015. Бюл. № 12.

5. Пат. 2275286, Российская Федерация МПК В24В 31/02 (2006.01). Устройство для вибрационной обработки / Серга Г.В., А.П. Бабичев, И.А. Бабичев, Н.Н. Довжикова, Ф.Ф. Кремянский; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет. № 2004131303/02; заявл. 25.10.2004; опубл. 27.06.2006. Бюл. № 12.
6. Пат. 2542203, Российская Федерация МПК В24В 31/02 (2006.01). Устройство для отделочно-зачистной обработки / Г.В. Серга, С.М. Резниченко; заявитель и патентообладатель Кубанский государственный аграрный университет. № 2013138980/02; заявл. 20.08.2013; опубл. 20.02.2015. Бюл. № 5.
7. Лебедев В.А., Серга Г.В., Чаава М.М., Дёмин Г.В. Компонентные схемы малогабаритных роторно-винтовых вибрационных технологических систем для отделочно-упрочняющей обработки деталей // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 10 (76). С. 24–27.

References

1. Koshkin L. N. *Rotornye i rotorno-konveyernye linii* [Rotary and rotor-conveyor lines]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1986, 319 p. (In Russian).
2. Serga G.V., Lebedev V.A. Implementation of L.N. Koshkin's philosophy in vibrostrengthening technologies as exemplified by helical rotors. *Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoy tekhnicheskoy akademii im P.A. Solov'yova* [Vestnik of P. A. Solovyov Rybinsk State Aviation Technical University]. 2017, no. 2 (41), pp. 126–132. (In Russian).
3. Serga G.V., Lebedev V.A., Belokur K.A., Yakovlev D.Ya. Increased productivity of technological systems for finishing and strengthening processing parts based on using screw rotors. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Strengthening Technologies and Coatings]. 2016, no. 4 (136), pp. 16–19. (In Russian).
4. Serga G.V., Reznichenko S.M. *Stanok dlya abrazivnoi obrabotki detalei s otdeleniem obrabotannykh de-*

- talei ot abrazivnykh granul i otkhodov obrabotki* [Machine-tool for abrasive processing of parts with the separation of machined parts from abrasive granules and waste products]. Patent RF, no. 2549793, 2015.
5. Serga G.V., Babichev A.P., Babichev I.A., Dovzhikova N.N., Kremianskiy F.F. *Ustroystvo dlya vibratsionnoi obrabotki* [Device for vibration processing]. Patent RF, no. 2275286, 2006.
6. Serga G.V., Reznichenko S.M. *Ustroystvo dlya otdelochno-zachistnoi obrabotki* [Device for finishing operation]. Patent RF, no. 2542203, 2015.
7. Lebedev V.A., Serga G.V., Chaava M.M., Dyomin G.V. Arrangement circuits of small-size of rotor-helical vibration technological systems for parts finishing-strengthening. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering]. 2017, no. 10 (76), pp. 24–27.

Критерии авторства

Серга Г.В., Марченко А.Ю., Хвостик Э.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Serga G.V., Marchenko A.Yu., Khvostik E.A. claim 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.



Обзорная статья / Review article

УДК 621.791:625.143.48

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-41-68>

АНАЛИЗ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ СВАРКИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ РЕЛЬСОВ С ПОЗИЦИИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И РЕКОНСТРУКЦИИ СКОРОСТНЫХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ (ОБЗОР). ЧАСТЬ 2

© М.Г. Штайгер¹, А.Е. Балановский²

¹ПАО «Мечел»,

125167, Российская Федерация, г. Москва, ул. Красноармейская, 1.

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,

664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Проанализировать работы в области сварки высокопрочных рельсовых сталей для бесстыкового пути с позиции структурообразования в сварном рельсовом стыке, выполненные в России и за рубежом. **МЕТОДЫ.** Сравниваются и анализируются различные технологии сварки рельсов. На основе металлографических исследований проанализирован структурный фактор сварного рельсового соединения. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Рассмотрены основные направления исследований и полученные разными авторами результаты в области сварки рельсов. Проанализированы особенности, предъявляемые к бесстыковому пути, в области сварки для различных технологических способов (алюминотермитная сварка, стыковая контактная сварка оплавлением, газопрессовая сварка, сварка трением, ручная дуговая сварка). Выполнен анализ работ с учетом получаемых структур в сварочном шве и зоне термического влияния для основных способов сварки рельса: алюминотермитного, газопрессового, стыкового с оплавлением, линейного способа трением, электродугового, электрошлакового. Выполнен сравнительный анализ макроструктуры и твердости сварного рельсового стыка для анализируемых способов сварки. Проведен анализ технологий сварки рельса, внедренных на дорогах РФ и мира. **ВЫВОДЫ.** Показано, что алюминотермитную сварку рельсов с позиции структурного фактора, низких значений ударной вязкости и трещиностойкости при отрицательных температурах, высокого уровня дефектообразования в рельсовом стыке нельзя рекомендовать при строительстве и реконструкции скоростных бесстыковых путей, поскольку этот способ не обеспечивает высокое качество рельсового стыка и снижает безопасность движения. Другие способы сварки рельса по физико-механическим свойствам в сварном шве обеспечивают высокое качество рельсового стыка и являются более перспективными. Однако необходимо провести дополнительные исследования процессов структурообразования в сварочном шве и зоне термического влияния в условиях отрицательных температур и высоких удельных нагрузок на рельсовый стык.

Ключевые слова: алюминотермитная сварка, стыковая контактная сварка с оплавлением, сварка трением, электрошлаковая сварка, структура, перлит, феррит, аустенит, твердость, дефекты рельса, контроль качества, твердость рельса, отказы, неисправности, бесстыковой путь, рельсовые стали.

Информация о статье. Дата поступления 05 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 11 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Штайгер М.Г., Балановский А.Е. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (обзор). Часть 2 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 41–68. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-41-68

¹Штайгер Максим Григорьевич, директор Департамента развития железнодорожной продукции ООО «УК Мечел-Сталь».

Maxim G. Shtaiger, Director of the Railway Products Development Department of Mechel-Steel Management Company ООО.

²Балановский Андрей Евгеньевич, доцент кафедры машиностроительных технологий и материалов, e-mail: fuco.64@mail.ru

Andrey E. Balanovsky, Associate Professor of the Department of Machine-Building Technologies and Materials, e-mail: fuco.64@mail.ru



ANALYSIS OF WELDING TECHNOLOGIES OF HIGH-STRENGTH RAILS IN TERMS OF STRUCTURE FORMATION UNDER CONSTRUCTION AND RECONSTRUCTION OF HIGH SPEED RAILROADS (REVIEW). PART 2

M.G. Shtaiger, A.E. Balanovsky

Mechel PJSC,
1, Krasnoarmeiskaya St., Moscow, 125167, Russian Federation
Irkutsk National Research State Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the study is to analyze the welding of high-strength rail steels for continuous welded rail in terms of structure formation in the welded rail joint performed in Russia and abroad. **METHODS.** Various technologies of rail welding are compared and analyzed. The structural factor in the welded rail joint is analyzed on the basis of metallographic studies. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Consideration is given to the main research directions and the results obtained by different authors in the field of rail welding. Analysis is given to the requirements for the continuous rail track in the field of welding for various technological methods (aluminothermic welding, flash butt resistance welding, gas pressure welding, friction welding, manual arc welding). The works are analyzed taking into account the received structures in the welding joint and the zone of thermal influence for the main methods of rail welding including aluminothermic, gas pressure, resistance flash welding, linear friction method, electric arc, and electroslag methods. The macrostructures and hardness of the welded rail joint are compared for the welding methods under investigation. In addition, the rail welding technologies introduced on the Russian and foreign railroads are analyzed. **CONCLUSIONS.** It is shown that in terms of the structural factor, low values of impact resilience and crack resistance at negative temperatures, high level of defect formation in the rail joint, the aluminothermic welding of rails can not be recommended for the construction and reconstruction of high-speed continuous welded railroads. This method does not provide high quality of the rail joint and reduces traffic safety. Other methods of rail welding provide high quality of the rail joint and are more promising according to the physical and mechanical properties in the welded joint. However, it is required to conduct additional studies of the processes of structure formation in the welded joint and the zone of thermal influence under conditions of negative temperatures and high specific loads on the rail joint.

Keywords: *aluminothermic welding, resistance flash welding, friction welding, electroslag welding, structure, perlite, ferrite, austenite, hardness, rail defects, quality control, rail hardness, failures, faults, continuous welded rail, rail steels*

Information about the article. Received April 05, 2018; accepted for publication June 11, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Shtaiger M.G., Balanovsky A.E. Analysis of welding technologies of high-strength rails in terms of structure formation under construction and reconstruction of high speed railroads (review). Part 2. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 41–68. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-41-68 (In Russian).

Введение

В первой части обзора [1] авторами настоящей статьи проведен анализ причин образования дефектов в сварном рельсовом стыке на основе статистических данных ОАО «РЖД». Проанализирован один из распространенных способов сварки рельсов на дорогах ОАО «РЖД» – алюминотермитный [2–5]. Показано, что данный способ по своей физической сущности является чисто металлургическим процессом с последующей разливкой (заливкой) расплавленного металла и шлака в рельсовый

стык. Концы рельсового стыка перед заливкой металла нагреваются до температуры 800–900°C в соответствии с ТУ 0921-127-01124323-2005³ либо до 1200–1300°C согласно данным [4, 5]. С позиции структурного фактора для крупнозернистой перегретой структуры металла алюминотермитного стыка характерны пониженная пластичность и ударная вязкость, что подтверждается экспериментальными работами [7, 9]. Известно, что низкие значения ударной вязкости отрицательно влияют на устойчи-

³ТУ 0921-127-01124323-2005. Сварка рельсов алюминотермитным методом промежуточного литья. Технические условия; введ. 01.04.2005 г. М.: ВНИИЖТ, 2005. 16 с. / TU 0921-127-01124323-2005. Welding of rails by the aluminothermic method of intermediate casting. Technical conditions; introduced 1 April 2005. Moscow: VNIIZhT Publ., 2005. 16 p.



вость металла к хрупким разрушениям [8, 9]. Проведенный анализ технологических особенностей алюмотермитной сварки рельсов [1] показывает отсутствие фундаментальных теоретических и практических исследований макро- и микроструктурного состояния металла в зоне сварного стыка и термического влияния. Кроме того, и это особенно важно отметить, что невозможность контролирования алюмотермитного процесса на всех его стадиях ставит под сомнение его эффективность с точки зрения получения оптимальной структуры в сварочном стыке рельсовой стали.

С целью оценки эффективности дру-

гих способов сварки рельсов рассмотрим вопросы структурообразования в сварном шве и зоне термического влияния с учетом особенностей этих способов. Из открытых источников информации установлено, что распространенными способами сварки рельсов в различных странах являются электродуговой и электрошлаковый процессы, контактно стыковые способы оплавлением, газопрессовая сварка, линейная сварка трением. Данные технологические процессы сварки рельсов, относительно управляемые на всех стадиях осуществления, представлены ниже.

Электродуговая сварка рельсов штучными электродами, механизированная с использованием сварочных проволок

В настоящее время уже имеются разработки по сварке рельсовых сталей путем:

- регулирования термического цикла сварки и временных сварочных напряжений;
- применения сварочных электродов, сварочных проволок с низкой температурой плавления;
- снижения содержания диффузионного водорода в металле шва;
- применения дополнительных технологических приемов, таких как предварительная наплавка кромок разделки соединения;
- применения специальной техники сварки и др. [10–14].

Наиболее простым и доступным способом является регулирование термического цикла путем применения предварительного и сопутствующего подогревов соединения наряду с оптимальным выбором режимов сварки. Во многих случаях сварка среднелегированных углеродистых сталей при таком подходе позволяет практически полностью устранить опасность образования холодных трещин в соединении. Идеальным термическим циклом сварки считается такой, при котором не происходит перегрева металла в околошовном участке зоны термического влияния (ЗТВ) в резуль-

тате его быстрого нагрева и охлаждения при температурах выше температуры A_{c1} . Замедленное охлаждение ниже температуры A_{c1} способствует развитию в околошовном участке перлитного и промежуточного превращений переохлажденного аустенита [12, 13]. При этом существенно уменьшается количество закалочных структур, и сопротивляемость металла ЗТВ соединений замедленному разрушению повышается.

На поз. 1 рис. 1 приведена диаграмма превращения переохлажденного аустенита рельсовой стали, а на поз. 2 – характерные участки микроструктуры металла ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72%. Видно, что превращение переохлажденного аустенита при скоростях охлаждения 10–22° С/с происходит преимущественно в мартенситной области. Под действием термического цикла дуговой наплавки температура начала превращения аустенита в мартенсит (T_{Mn}) в металле ЗТВ стали М76 в зависимости от развития превращений в промежуточной области составляет 240–205°С. Температура начала мартенситного превращения – 220°С. Твердость закаленного металла составляет 60–65 HRC. Уменьшение скорости охлаждения в этом интервале не приводит к существенным изменениям в структуре.

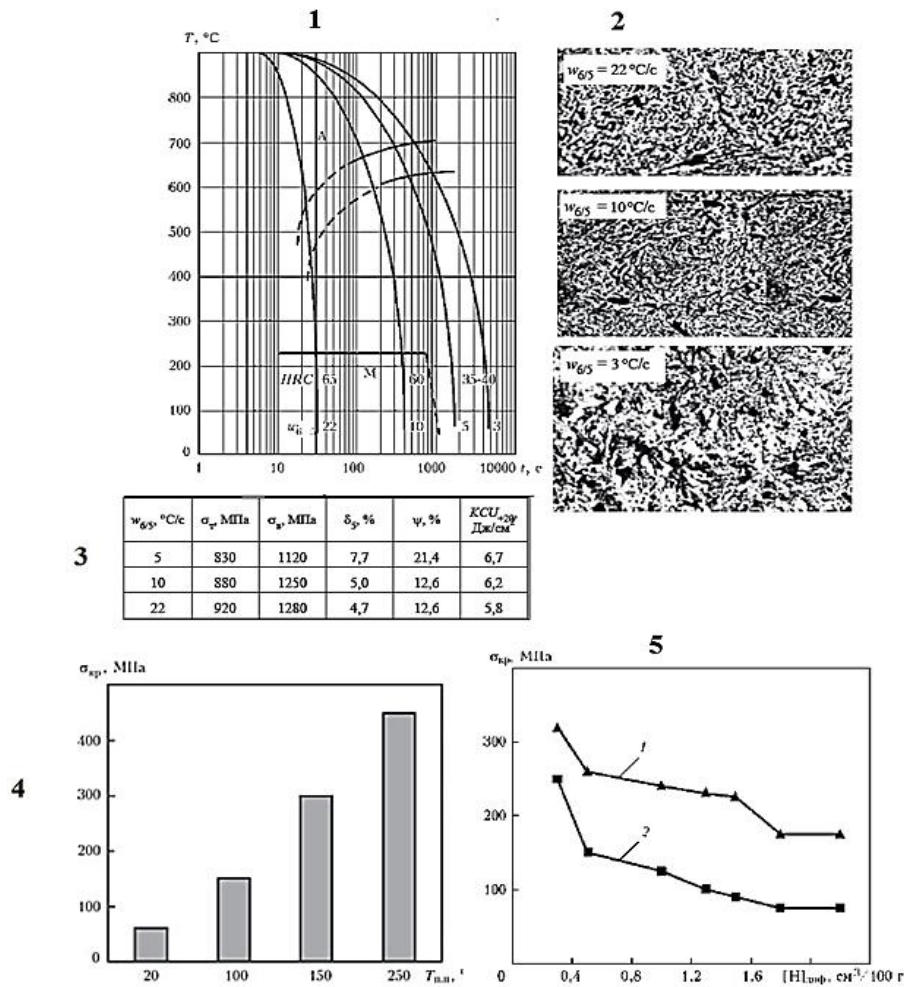


Рис. 1. Превращение переохлажденного аустенита в металле ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72% ($T_{\max} = 1320^\circ\text{C}$; $t_{\text{нагр}} = 6 \text{ с}$) [12]
Fig. 1. Transformation of supercooled austenite in the heat-affected zone metal of rail steel with the carbon content of 0.72% ($T_{\max} = 1320^\circ\text{C}$, $t_{\text{heat}} = 6 \text{ s}$) [12]

На рис. 1 представлены: 1 – термокинетическая диаграмма распада аустенита рельсовой стали в зависимости от скорости охлаждения; 2 – структура металла в зоне термического влияния в зависимости от скорости охлаждения; 3 – изменения механических свойств в зоне термического влияния от скорости охлаждения; 4 – влияние температуры предварительного подогрева на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений рельсовой стали при сварке; 5 – влияние содержания диффузионно-подвижного водорода в сварном шве на критическое напряжение разрушения в зависимости от погонной энергии.

Дальнейшее замедление охлаждения ($w_{6/5} \leq 10 ^\circ\text{C/c}$) способствует уменьше-

нию твердости металла, что связано с кинетикой распада аустенита (рис. 1, поз. 1). При скорости охлаждения 3–5 $^\circ\text{C/c}$ закалочные структуры отсутствуют, превращение в металле ЗТВ происходит преимущественно в перлитной области, а твердость металла понижается до 35–40 HRC. Анализ диаграммы превращения аустенита позволяет утверждать, что в металле ЗТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72% образование закалочных структур происходит при скоростях охлаждения выше 5 $^\circ\text{C/c}$. Применении предварительного подогрева соединений до 200 $^\circ\text{C}$ позволяет избежать закалочных структур в зоне термического влияния (рис. 1, поз. 3 и 4). Учитывая, что содержание углерода в рельсовой стали может быть более высоким (до 0,82% и



выше) и мартенситное превращение может протекать при более низких скоростях охлаждения ($w_{6/5} \leq 5$ °C/c), температура предварительного подогрева $T_{п.п}$ при сварке рельсов должна быть не менее 250–300°C. Важно отметить, что при дуговой сварке высокопрочных рельсовых сталей, содержание углерода в которых превышает 0,60%, наиболее опасным местом соединений, где наиболее вероятно образование холодных трещин, является металл участка перегрева ЗТВ [12–14]. Это связано с особенностями влияния термодеформационного цикла дуговой сварки на процесс гомогенизации аустенита в высокотемпературной области термического цикла и последующим γ - α -превращением при охлаждении. В результате в металле участка перегрева ЗТВ формируется структура с повышенной плотностью дислокаций и высоким уровнем внутренних напряжений. Это приводит к тому, что даже при сравнительно низком содержании диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле (до 2,2 см³/100 г) при сварке высокопрочной рельсовой стали критические напряжения при замедленном разрушении составляют всего 0,1–0,25 от предела текучести металла ЗТВ. На рис. 1, поз. 5, показаны экспериментальные значения снижения критических напряжений при замедленном разрушении в зависимости от различных значений погонной энергии (кривые 1 и 2) и содержания диффузионно-подвижного водорода в наплавленном металле.

Известны технологии электродуговой сварки рельсов в полевых условиях, которые используются на железных дорогах Швеции уже в течение многих лет ⁴ [14, 16]. Аналогичные технологии, разработанные компанией ESAB, одобрены для применения на железных дорогах Дании и

Норвегии.

Известны работы японских ученых в области дуговой сварки рельсов [17, 18]. В частности, в 1963–1970 гг. в Японии был разработан «Enclosed manual metal arc welding process used for field welding rails» – дословно: процесс ручной дуговой сварки закрытой дугой рельсов [19]. По запросу железной дороги Японии компания Kobe Steel разработала в 1963 г. способ сварки рельсов Enclosed arc welding process для строительства скоростной линии Ямагата–Шинкасен (Shinkansen Super-Express). Для сварки рельсов закрытой дугой были разработаны новые сварочные электроды основного типа LB-116(E11016-G) и LB-80EM, что позволило значительно улучшить качество сварных соединений по сравнению с термитной сваркой. Время сварки стыка с последующей термообработкой составляло 75 мин (для сравнения, общее время сварки рельсового стыка алюминотермитным способом – 55 мин⁵). Температура предварительного подогрева концов рельса составляла 500°C, диаметр сварочных электродов – 5–8 мм, сила сварочного тока – 250–400 А [17–19].

Необходимо отметить особенность данного способа. Известно, что при сварке шлак играет несравнимо большую роль, чем в металлургии стали: в процессе сварки шлак является не только регулятором хода химических реакций, как это имеет место в печах, но и фактором формирования и термической обработки соединения, фактором технологическим, определяющим возможность сварки в различных пространственных положениях шва, использования при этом определенного рода электрического тока, а также возможность наблюдения формирования металла шва. Металлургов не интересуют физико-химические свойства шлака после заливки

⁴Dahl B., Mogard B. Ремонт рельсовых путей на месте методом сварки: рекламный буклет ESAB [Электронный ресурс]. URL: <http://docplayer.ru/70482797-Remont-relsovyh-putey-na-meste-metodom-svarki.html> / Dahl B., Mogard V. On-site repair of rail tracks by welding: ESAB advertising booklet [Electronic resource].

⁵Технология алюминотермитной сварки рельсов с коротким временем подогрева (SkV, SkV-L 50, SkV-L 75). СПб.: Изд-во ООО «Алюмотермитная сварка», 2007. 21 с. / Technology of aluminothermic welding of rails with a short heating period (SkV, SkV-L 50, SkV-L 75). SPb.: Publishing house of Alumothermic welding JSC, 2007. 21 p.



стали, тогда как для сварщиков свойства шлака и после наложения шва в интервале температур от кристаллизации до полного остывания имеют большое значение: шлак в процессе его остывания должен равномерно распределяться по поверхности наплавленного металла, долгое время оставаться газопроницаемым, быстро кристаллизоваться без растрескивания, легко отделяться от металла шва. Наибольшее влияние на свойства стали оказывает оксид железа (FeO), поскольку только он растворяется в железе. Присутствие кислорода в металле шва в виде твердого раствора или включений окислов понижает механические свойства, снижает стойкость металла против коррозии, увеличивает вероятность хрупкого разрушения. Растворимость оксида железа в стали зависит главным образом от содержания углерода и температуры металла. С увеличением содержа-

ния углерода в стали растворимость оксида железа снижается. При высокой температуре стали растворимость оксида железа выше, чем при низкой температуре. При охлаждении стали происходит выпадение из раствора оксида железа. При высоких скоростях охлаждения часть оксида железа остается в растворе, образуя шлаковые прослойки между зернами металла. Учитывая все эти факторы, специалисты компании Kobe Steel взяли за основу электроды с основным покрытием, сварочные шлаки которых имеют высокие раскислительные свойства, когда неметаллические включения из наплавленного металла переходят в сварочный шлак и наплавленный металл не имеет шлаковых и неметаллических включений, в то время как электроды с рутиловым и кислым покрытием оставляют в металле неметаллические включения (рис. 2).

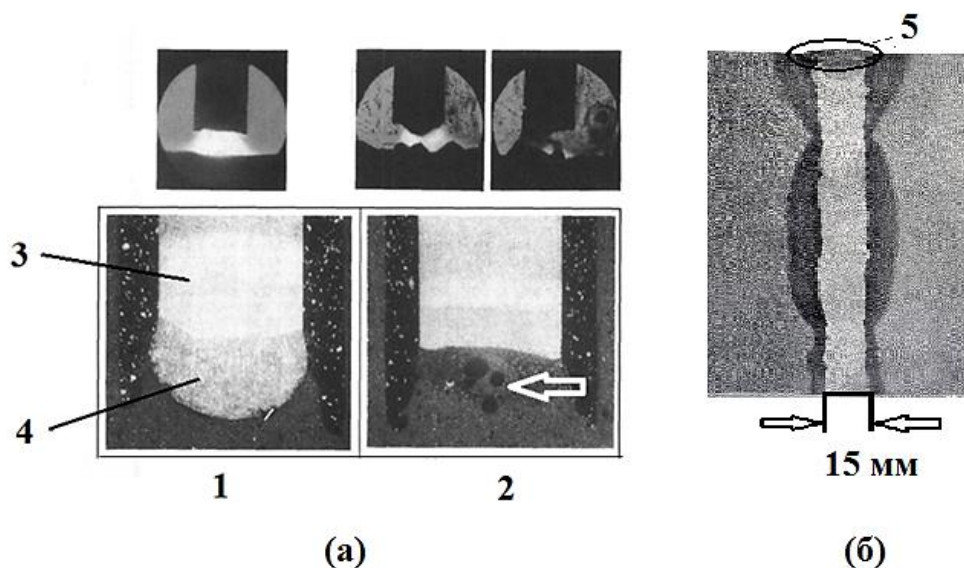


Рис. 2. Визуализация шлаковой ванны и наплавленного металла при сварке рельса электродами (а) с основным покрытием (поз. 1) и рутиловым (поз. 2) и поперечный темплет макроструктуры рельсового стыка, сваренный по способу Enclosed arc welding process (б):

1 – сварочная ванна при сварке с основным покрытием; 2 – сварочная ванна при сварке рутиловыми электродами (стрелкой обозначены неметаллические включения); 3 – сварочный шлак; 4 – наплавленный металл; 5 – облицовочные упрочняющие швы на поверхности головки рельса

Fig. 2. Visualization of the slag bath and welded metal under welding of rail by electrodes (a) with the main coating (1) and rutile coating (2) and the transverse template of the macrostructure of the rail joint welded by the enclosed arc welding (b):

1 – welding bath when welding with the main coating; 2 – welding bath when welding by rutile electrodes (the arrow indicates non-metallic inclusions); 3 – welding slag; 4 – weld metal; 5 – facing reinforcement welds on the rail head surface



Кроме того, покрытие основного типа составлено на основе плавикового шпата (CaF_2) и карбонатов кальция и магния (мрамор, магнезит, доломит). При высокой температуре дуги карбонаты диссоциируют с образованием окислов кальция, магния, окиси и двуокиси углерода. Это обеспечивает высокий коэффициент основности образующихся шлаков и создает безводородную газозащитную среду. Наличие в покрытиях фтористого кальция придает им способность обезводороживать металл, что достигается связыванием водорода в термически стойкие соединения. Низкое содержание водорода в наплавленном металле делает электроды с основным покрытием незаменимыми при сварке рельсовых сталей с высоким содержанием углерода, склонных к образованию холодных трещин вследствие водородного охрупчивания, связанного с диффузией водорода из расплавленного металла шва в околошовную зону. Малая окислительная способность основных покрытий обеспечивает высокий коэффициент перехода легирующих элементов из электрода в сварной шов, благодаря чему достигается эффективное раскисление и легирование наплавленного металла. Важным технологическим преимуществом электродов с основным покрытием является образование в процессе плавления «юбочки» (козырек, втулочка) на конце электрода вследствие неравномерности плавления электродного стержня и покрытия, связанное с отставанием плавления обмазки от расплавления стержня. Изолируя факел дуги от контакта с воздухом, «юбочка» способствует предохранению плавящегося стержня от насыщения расплавленных капель кислородом и азотом (рис. 2, а, поз. 1). Реагирующая поверхность обмазки благодаря «юбочке» значительно увеличивается, вследствие чего уменьшается вредное влияние на процесс сварки неравномерности распределения ее компонентов.

«Юбочка» существенно облегчает ведение сварки при малых углах и большой глубине разделки, а также на вертикальной плоскости и в потолочном положении. Это

позволяет уменьшить зазор между рельсами до 12–15 мм (рис. 2, б) и получить узкий сварочный шов, зону термического влияния, а также более качественно обеспечить газовую защиту расплавленного металла от окислительного воздействия кислорода воздуха.

В ходе комплексных исследований процесса Enclosed arc welding по сварке рельсов группе японских ученых (К. Karimine, К. Uchino, М. Okamura, Т. Ямамото) удалось добиться снижения времени сварки рельсового стыка до 30 мин, температуры предварительного подогрева – до 300°C , а также снизить силу сварочного тока. Кроме того, ими разработаны новые сварочные низководородистые электроды, обеспечивающие высокие показатели механических свойств наплавленного металла.

Компанией «Nippon Steel» разработан новый процесс, призванный в перспективе заменить алюмотермитную и ручную Enclosed arc welding process рельсов [18, 19]. Он основан на комбинации сварки в защитных газах вращающимся плавящимся электродом (сварка подошвы) и электрошлаковой сварки (сварка шейки и головки рельсов). Весь процесс осуществляется в автоматическом режиме с помощью аппарата, контролируемого компьютером. Данная технология обеспечивает более высокие механические свойства сварных соединений, чем алюмотермитная сварка. Время сварки стыка составляет около 100 мин, хотя имеется возможность в перспективе сократить его до 50–60 мин, что всего лишь приблизит данный процесс по производительности к алюмотермитной сварке.

В работах сотрудников фирмы ESAB подробно описана технология сварки рельса по способу Enclosed arc welding [14–16]. Последовательность операций представлена на рис. 3. Зазор между свариваемыми торцами рельсов должен составлять 15–18 мм. Для рельсов R200 температура подогрева составляет 350°C , для рельсов R260 – 400°C . Подкладку ОК Backing 21.21 размером $200 \times 60 \times 13$ мм устанавли-



вают и фиксируют под зазором между рельсами (рис. 3, поз. 1, 2). Данная подкладка обеспечивает плавный переход между наплавляемым металлом и материалом рельса. Это очень важно, так как усталостная прочность сварного шва в значительной мере зависит от его формы и отсутствия концентраторов напряжений. Сварка начинается с подошвы рельса (рис. 3, поз. 2). Корневые валики наплавляются в соответствии со схемой, представленной на рис. 3. Наплавляемые сверху валики на подошве должны образовывать максимально гладкий шов с плавными переходами к основному металлу. Подрезы не допускаются. После контроля рабочей температуры с обеих сторон рельса закрепляются медные башмаки (рис. 3, поз. 3, 4). При заварке шейки рельса электрод

необходимо вести по прямоугольному контуру, образованному стенками рельса и башмаков, с небольшими остановками в углах (рис. 3). Смену электродов надо выполнять очень быстро, пока шлак не успел затвердеть. Когда наплавленный металл достигнет головки рельса, движение электрода надо изменить на колебательное. После окончания сварки медные башмаки удаляются, а головка рельса проковывается, пока она не остыла. На рис. 3, поз. 4, показан готовый шов.

На рис. 4 приведена микроструктура металла шва, состоящая в основном из феррита с небольшим количеством перлита. Наблюдаемые зерна феррита имеют небольшие размеры, что обеспечивает более высокую прочность и пластичность металла шва рельса [15, 16].

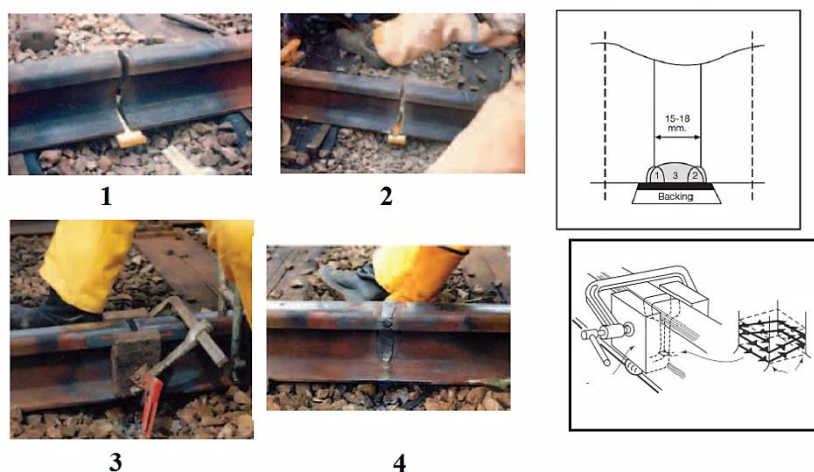


Рис. 3. Технология ручной дуговой сварки рельса, разработанная фирмой ESAB
Fig. 3. ESAB company technology of manual arc welding of rails

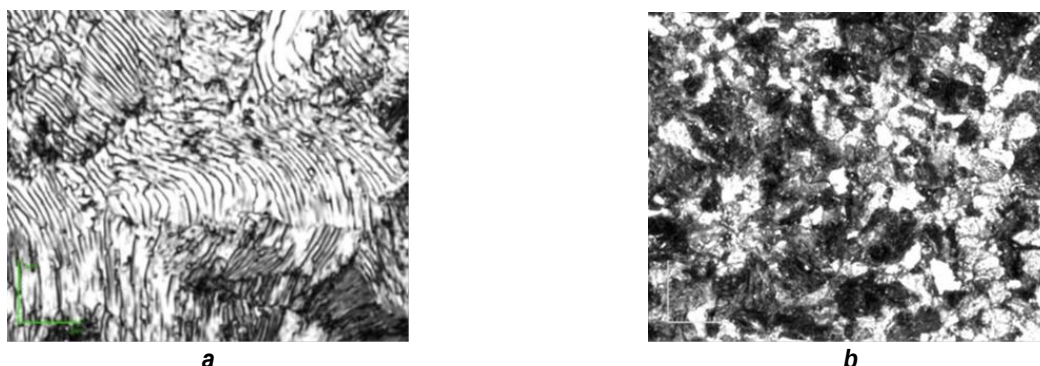


Рис. 4. Микроструктура металла шва после ручной дуговой сварки:
a – основной металл; b – металл шва
Fig. 4. Microstructure of weld joint metal after manual arc welding:
a – basic metal; b – joint metal



В работах [12, 13] рассмотрена сварка рельсов с использованием сварочной проволоки Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Показано, что в металле 3ТВ рельсовой стали с содержанием углерода 0,72% образование закалочных структур происходит при скоростях охлаждения выше 5 °C/с. Учитывая, что содержание углерода в рельсовой стали может быть более высоким (до 0,82%) и мартенситное превращение может протекать при более низких скоростях охлаждения ($w_{6/5} \leq 5$ °C/с), температура предварительного подогрева $T_{п.п}$ при сварке рельсов должна быть, по мнению авторов, не менее 250–300 °C. Без применения предварительного подогрева до температуры 250 °C исключить образование холодных трещин в соединениях невозможно. Увеличение погонной энергии сварки способствует только замедлению процессов развития холодных трещин в сварных соединениях, но не предотвращает их зарождение. При сварке проволокой Св-08Х20Н9Г7Т (А+Ф) на погонной энергии 8,6 кДж/см без предварительного подогрева ($T_{п.п} = 20$ °C) критические напряжения разрушения составляют всего 100 МПа. Это немного выше, чем при аналогичных условиях сварки ферритно-перлитной проволокой Св-08Г2С (Ф+П), но существенно ниже уровня $\sigma_{кр}$, который обеспечивается применением предварительного подогрева металла до температуры 250 °C. Из анализа работ [12–19] можно сделать важный практический вывод: оптимальная температура предварительного нагрева для сварки рельсовых сталей находится в диапазоне 300–380 °C.

Авторы работы [20], проведя анализ технологий сварки рельса, показали, что в настоящее время электродуговая ванная сварка покрытыми электродами широко применяется для соединения трамвайных и крановых рельсов. Однако этот способ, по мнению авторов, не обеспечивает надежного качества сварных соединений, так как существенно зависит от квалификации сварщика и значительно уступает по производительности другим способам сварки. С целью повышения производительности

разработан процесс полуавтоматической электродуговой ванный сварки стыков рельсов, который применяла Берлинская транспортная компания при ремонте железнодорожных путей метрополитена. При этом использовался специальный удлиненный токоподводящий мундштук и самозащитная порошковая проволока. В результате производительность сварки повысилась на 30% по сравнению с ручной электродуговой сваркой покрытыми электродами. В Институте электросварки (ИЭС) им. Е.О. Патона Национальной академии наук (НАН) Украины разработана новая технология сварки рельсов [20], получившая название *автоматической электродуговой сварки ванным способом с использованием плавящегося мундштука*, или сокращенно – *дуговой сварки плавящимся мундштуком* (рис. 5). Его отличительной особенностью является использование самозащитной порошковой проволоки, подаваемой через продольный канал в специальном плоском плавящемся мундштуке, что позволяет выполнять сварку при зазоре в стыке 12–16 мм, а в отдельных случаях – до 22 мм. Предлагаемый способ сварки, являясь дальнейшим развитием электродуговой ванный сварки, благодаря механизации процесса позволяет в 2–3 раза увеличить производительность работ и одновременно существенно улучшить качественные показатели сварных соединений, сохраняя высокую мобильность и универсальность оборудования.

Сварку осуществляют плавящимся мундштуком, совершающим возвратно-поступательные перемещения переменной амплитуды, благодаря чему обеспечивается полный провар свариваемых кромок по всему сечению рельса. Сварку подошвы выполняют на керамической подкладке многопроходной сваркой, после чего специальным рычажным механизмом без прерывания процесса осуществляют прижатие медных башмаков, обеспечивающих формирование боковых поверхностей шва при сварке шейки и головки рельсов. В большинстве случаев предварительный подогрев перед сваркой не проводится, и лишь



при температуре ниже $+5^{\circ}\text{C}$ требуется подогрев стыка до $250\text{--}300^{\circ}\text{C}$, при этом сварку можно выполнять при температуре окружающего воздуха до -5°C . Твердость металла шва сварного соединения рельсов Р65 составляет НВ 260–320, предел прочности металла шва – 800–900 МПа. Разрушающая нагрузка при испытании рельсов на статический изгиб составляет 1500–1650 кН при прогибе 16–22 мм [20]. Преимуществами данного способа сварки являются:

- более высокое и стабильное качество сварных соединений по сравнению с ручной дуговой ванной и алюминотермичной сваркой;
- высокая производительность (до 16 стыков за смену);
- низкое энергопотребление (потребляемая мощность – до 15 кВт·А);
- легкое перенастраивание оборудования для сварки рельсов различных типоразмеров;
- высокая мобильность, что особенно важно при выполнении ремонтных работ.

Кроме того, при этом способе сварки не требуется защитный газ или флюс, подогрев (при температуре $+5^{\circ}\text{C}$ и выше) и термическая обработка стыка.

По мнению авторов [20], разработанный ИЭС им. Е.О. Патона новый процесс электродуговой сварки рельсов благодаря своим преимуществам может рассматриваться в качестве альтернативы существующим способам сварки при выполнении работ в условиях пути.

В 1970-е гг. сотрудниками ИЭС им. Е.О. Патона был запатентован способ сварки закладным электродом. Данный способ является наиболее производительным при условии серийности производства и не требует последующей термообработки, как в случае электрошлаковой сварки (рис. 6).

При сварке закладным электродом качество шва по механическим свойствам не уступает обычным дуговым процессам сварки. Также экономится сам металл, поскольку сварка выполняется в узкий зазор,

равный 8–10 мм. Толщина свариваемого металла составляет 16–150 мм. Процесс основан на способности электрической дуги самостоятельно перемещаться по торцу плоского изолированного электрода большого сечения (до 1000 мм^2), предварительно заложенного в стык между свариваемыми деталями (см. рис. 6). При этом автоматически устанавливаются основные параметры режима сварки и обеспечивается эффективное проплавление стыка при низких плотностях тока на электроде в диапазоне $0,7\text{--}3,0\text{ А/мм}^2$. Закладной электрод имеет специальное электроизолирующее покрытие толщиной до 1,5 мм. Кроме электроизоляции покрытие электрода обеспечивает эффективную газошлаковую защиту зоны сварки (содержание остаточного водорода в шве менее $5\text{ см}^3/100\text{ г}$), а также рафинирование и дополнительное легирование металла шва. Дефицит металла шва компенсируется либо за счет перемещения в зону сварки самого закладного электрода, либо посредством подачи через него порошковых или сплошного сечения проволок. При использовании проволок для компенсации дефицита металла шва закладной электрод выполняет функцию неподвижного плавящегося мундштука. Необходимо отметить, что по своей физической сущности сварка закладным электродом является усовершенствованным вариантом процесса электродуговой ванной сварки, но отличается тем, что с целью повышения производительности и качества сварного соединения вместо электродов для ручной дуговой сварки используется специальный плоский электрод, форма которого подобна сечению свариваемого рельса. Этот электрод устанавливается в зазоре между свариваемыми рельсами, стык закрывается формирующими приспособлениями, на конце электрода зажигается дуга и начинается процесс сварки, который осуществляется в автоматическом режиме. Время сварки одного стыка в зависимости от типоразмера рельса составляет 5–8 мин при номинальном сварочном токе 500–600 А.

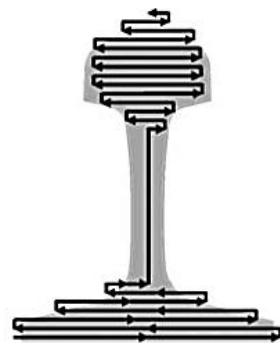


Рис. 5. Аппарат APC-4 для сварки рельсов и схема перемещения мундштука при электродуговой сварке рельсов ванным способом с использованием плавящегося мундштука
Fig. 5. ARS-4 apparatus for welding rails and a diagram of contact tube motion under electric arc welding of rails by the bath method using a consumable contact tube

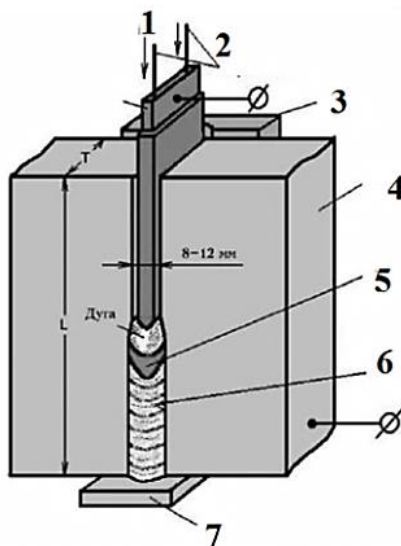


Рис. 6. Схема сварки рельс закладным электродом: 1 – изолирующий плавящийся электрод; 2 – присадочные проволоки; 3 – формирующие накладки; 4 – основной металл; 5 – сварочная ванна; 6 – шов; 7 – подкладка
Fig. 6. Diagram of rail welding by a buried electrode: 1 – insulating melting electrode; 2 – filler metal wires; 3 – forming pads; 4 – base metal; 5 – welding bath; 6 – joint; 7 – lining

Преимуществами данного способа являются [20]:

- высокое и стабильное качество сварных соединений;
- высокая производительность (2–3 стыка в час на одной установке);
- сварка ведется порошковой проволокой специального состава, при этом не требуется защитный газ или флюс;
- высокая мобильность, что особенно важно при выполнении ремонтных работ.

Одним аппаратом в смену можно

сварить до 20 стыков. Этапы сварки показаны на рис. 7. Таким образом, технологии сварки рельсов с использованием электрической дуги штучными электродами и сварочными проволоками позволяют регулировать термический цикл нагрева и охлаждения и, следовательно, управлять процессами структурообразования в металле шва и зоне термического влияния рельсовых стыков, что обеспечивает высокие механические свойства металла шва по сравнению с алюминотермитными стыками.

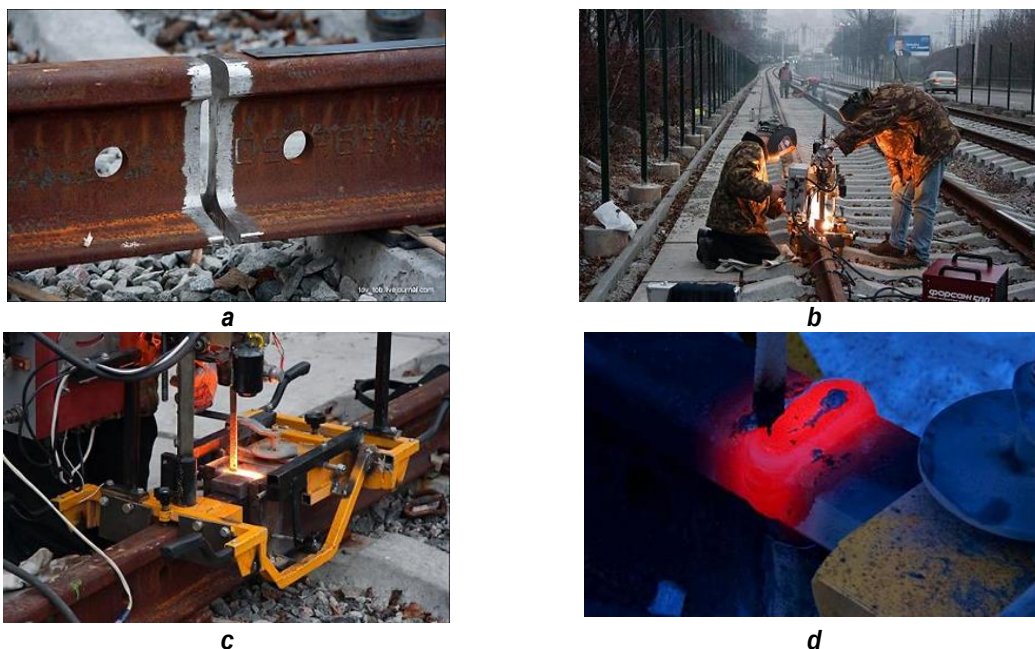


Рис. 7. Этапы выполнения сварки рельса закладным электродом:
a – подготовка под сварку концов рельсов; б – выставление зазора между рельсами;
с – процесс сварки; d – внешний вид стыка после сварки
Fig. 7. Stages of rail welding by a buried electrode:
a – rail end preparation for welding; b – gap setting between the rails;
c – welding process; d – view of the joint after welding

Электрошлаковая сварка рельсов

Электрошлаковая сварка рельсов не совсем отвечает требованиям к сварочным процессам по таким критериям, как минимальное время сварки, портативность и простота оборудования, на что указано в работе [21]. Однако работы по усовершенствованию данного способа сварки и сегодня активно ведутся в США и ряде стран Евросоюза. Известно, что первые работы в области ЭШС в СССР были выполнены еще в 1940–50-е гг. [22–26]. В ходе работы над технологией дуговой автоматической сварки под флюсом вертикальных швов с принудительным формированием Г.З. Волошкевич обнаружил, что в некоторых случаях (при глубине шлаковой ванны более 40 мм и ее перегреве) дуговой процесс становится неустойчивым и даже прекращается, однако электродный металл, флюс и крошки плавятся [22, 23]. Процесс плав-

ления осуществлялся за счет тепла омического сопротивления при прохождении тока через жидкий шлак. В 1949 г. на основе этого процесса в ИЭС им. Е.О. Патон и других организациях Советского Союза стали разрабатывать ЭШС. Первыми приняли участие в освоении и совершенствовании нового вида сварки Таганрогский котельный завод «Красный котельщик» (ТКЗ), Барнаулский котельный завод и Новокраматорский машиностроительный завод им. И.В. Сталина (НКМЗ). На ТКЗ были сварены сосуды высокого давления с толщиной стенки 90 мм. В 1951 г. на НКМЗ ЭШС применили при изготовлении статоров гидротурбин массой до 80 т, а позднее валов гидротурбин и гидрогенераторов. В 1956 г. вышла первая в мире книга, посвященная ЭШС⁶.

В 1959 г. было выпущено второе, значительно дополненное издание, пере-

⁶Электрошлаковая сварка / под ред. Б.Е. Патона. М.: Машгиз, 1956. 168 с. / Electroslag welding, under edition of B.E. Paton. Moscow: Mashgiz Pub., 1956. 168 p.



веденное затем на английский язык. Зарубежные фирмы получили подробную информацию о новом процессе, что значительно облегчило освоение ими ЭШС. В настоящее время электрошлаковая технология широко применяется при сварке крупных металлоконструкций, начиная от элементов зданий и мостов до корпусов крупных морских судов. Неоднократно предпринимались попытки разработать процесс электрошлаковой сварки рельсов [2, 24, 25], однако, несмотря на достаточно серьезную проработку вопроса достичь удовлетворительных результатов пока не удалось^{7,8}. В настоящее время по данным обзорных работ [26, 27] электрошлаковую сварку рельса пытаются адаптировать благодаря разработкам компании Electoslag System Technology and Development (ESTD). Одним из достоинств электрошлаковой сварки, по мнению разработчиков, является то, что микроструктура металла сварочного шва в общем случае аналогична получаемой при обычной алюминотермитной сварке, но имеет весьма низкую пористость и меньше инородных включений, часто появляющихся при расплавлении металла.

Начало работ в данном направлении было положено исследованиями Орегонского технологического института (США) в середине 1980-х гг. [27]. В 2000 г. компания ESTD приступила к разработке соответствующих технологий и оборудования, а в 2002 г. получила грант на продолжение этих разработок от Совета по транспортным исследованиям (Transportation Research Board, TRB) в соответствии с программой поощрения важнейших инноваций (Innovations Deserving Research Exploratory Analysis Program, IDEA). После этого в разработках и исследованиях был достигнут прогресс в части оптимизации оборудования и приспособлений, хотя добиться значимого улучшения механических характе-

ристик сварочных швов при сварке рельсов пока не удалось [26, 27] (основные результаты см. на рис. 7). В 2006 г. Департамент транспорта США официально классифицировал технологию электрошлаковой сварки в качестве дополнительной альтернативы традиционным сварочным процессам, применяемым в полевых условиях. В 2007 г. Департамент транспорта США и компания ESTD заключили соглашение о дальнейшем сотрудничестве в рамках программы «Стратегическая исследовательская инициатива по совершенствованию сварки рельсов» (Improved Rail Welding Strategic Research Initiative – IRWSRI).

На первом этапе были исследованы швы рельсовых стыков, выполненные по технологии ЭШС, с целью определения оптимальных параметров сварочного процесса. На рис. 8 схематично представлена технология электрошлаковой сварки, общие виды отдельных этапов, макро- и микроструктура шва, а также зоны термического влияния (крайний справа снимок макро- и микроструктур). Эти исследования, как и намечалось, позволили реализовать на следующем этапе работ требуемые механические показатели сварочных швов. Проведенные в ходе реализации первого этапа исследования включали распили множества образцов сварочных швов с их металлографическим изучением, а также анализ причин дефектов в швах, выявленных при испытаниях на статический изгиб. Результаты этих исследований показали, что микроструктура сварочных швов полностью состояла из перлита, за исключением нескольких участков в граничных зонах с мартенситной структурой (см. рис. 8). Кроме того, недостаточное расплавление металла в зоне подошвы рельса обуславливало уменьшение допустимой деформации при статическом изгибе. В соответствии с полученными на первом этапе результатами было рекомендовано совершенство-

⁷Turpin B., Danks D. Electroslog field welding of railroad rail. Contract Number HSR-37. Transportation Research Board. Washington, D.C. 2003.

⁸Gutscher D., Danks D., Turpin B. Electroslog welding: a potential alternative to conventional rail welding. Proc. technology digest TD-08-043. Association of American railroads, transportation technology center, Inc., Pueblo, Colo, Oct., 2008.



вать управление термическим циклом процесса сварки за счет изменения конструкции блочного кристаллизатора и целенаправленного предварительного нагрева.

На втором этапе с использованием рекомендаций, сформулированных по результатам первого этапа [26, 27], были уточнены режимы процесса ЭШС для проведения после этого испытаний в целях определения параметров полученных сварочных швов. На третьем этапе было продолжено совершенствование технологии электрошлаковой сварки на основе резуль-

татов второго этапа. Изготовленные при этом сварные рельсовые плети были уложены в путь на одном из путей полигона FAST (США) для испытаний в условиях высоких осевых нагрузок. Испытания на полигоне FAST продолжаются. Дальнейшее совершенствование сварочного процесса планируется осуществить на четвертом этапе, после чего предполагается начать испытания в реальных эксплуатационных условиях на действующих железных дорогах [27].

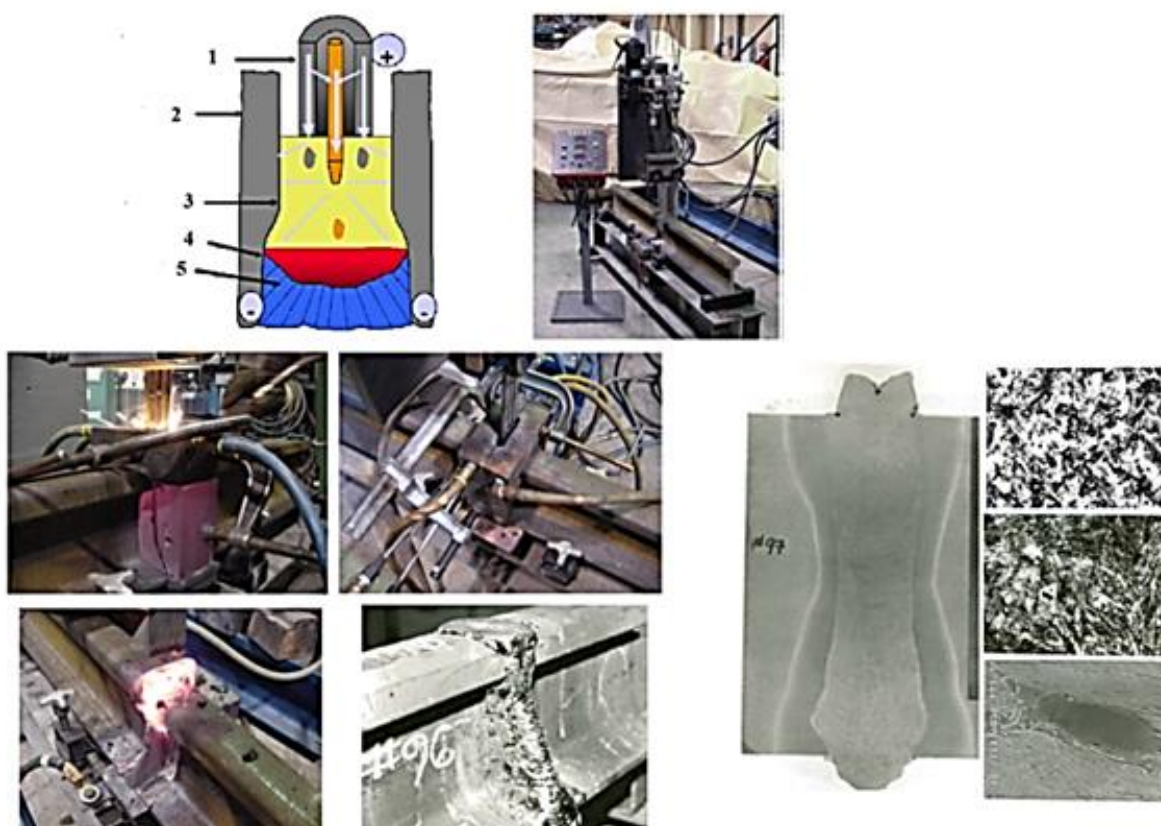


Рис. 8. Основные результаты по электрошлаковой сварке рельса:
1 – проволокоподающий механизм; 2 – поверхность рельса; 3 – шлаковый слой;
4 – расплавленный металл; 5 – закристаллизовавшийся металл стыка

Fig. 8. Main results of electroslag welding of rail:
1 – wire feeder; 2 – rail surface; 3 – slag layer; 4 – molten metal;
5 – crystallized joint metal

Газопрессовая сварка рельсов

Согласно принятой сегодня терминологии, газопрессовая сварка – это вид сварки давлением, при которой соединение встык нагревается газовым пламенем до оплавления или пластичного состояния ме-

талла с последующим сжиманием (осаживанием) соединяемых частей [28–30]. Нагрев обычно ведется ацетиленокислородным пламенем. Газопрессовая сварка характеризуется предварительным



выполнением цикла тепловой подготовки всего сечения, подлежащего сварке, с последующим единовременным сдавливанием по всей свариваемой поверхности. Газопрессовая сварка подразделяется на сварку с нагревом металла до пластического состояния и сварку с нагревом металла

до оплавления. При последующем сжатии жидкий металл выдавливается из зазора, и производится обычная сварка давлением металла, находящегося в твердом состоянии. Схематизация основных этапов сварки рельса представлена на рис. 9.



Рис. 9. Схематизация основных этапов газопрессовой сварки рельсов в Японии:
1 – тщательная очистка торцов поверхности рельса; 2 – установка и регулировка
основного оборудования для сварки; 3 – нагрев концов рельса; 4, 5 – осадка рельса;
6 – сваренный рельсовый стык

Fig. 9. Schematization of the main stages of gas-pressure welding of rails in Japan:
1 – thorough cleaning of the rail end butt surface; 2 – installation and adjustment of the main welding
equipment; 3 – heating of the rail ends; 4, 5 – draft of the rail; 6 – welded rail joint



Необходимо отметить, что при практической реализации большинства известных способов горячего формообразования металл в той или иной мере рекристаллизуется. Совокупность структурных изменений, вносимых в аустенит при горячей деформации и передаваемых в нашем случае перлиту и ферриту в результате охлаждения и сохраняющихся при последующем отпуске, будет определять влияние этой обработки на механические свойства рельсовой стали. Для понимания природы образования соединения между материалами в твердой фазе применительно к данному процессу необходимо обратиться к работам [28–30], где показано, что процесс образования соединения при любых способах сварки давлением без расплавления следует рассматривать как процесс, протекающий в три основные стадии:

1. Образование физического контакта, т.е. сближение атомов соединяемых материалов за счет пластической деформации на расстояние, при котором возникает физическое взаимодействие, обусловленное силами Ван-дер-Ваальса, или на расстояние, при котором возможно слабое химическое взаимодействие.

2. Активация контактных поверхностей (образование активных центров). При сварке однородных металлов первая и вторая стадии практически сливаются в одну, так как активация обеих контактных поверхностей начинается уже в процессе их сближения при смятии отдельных микровыступов за счет совместной пластической деформации.

3. Объемное взаимодействие. Эта стадия наступает с момента образования активных центров на соединяемых поверхностях. В течение этой стадии происходит развитие взаимодействия соединяемых материалов как в плоскости контакта с образованием прочных химических (в частном случае металлических) связей, так и в объеме зоны контакта. Этот процесс протекает на активных центрах, представляющих собой в частном случае дислокации с полем напряжения. В плоскости контакта он заканчивается слиянием дискретных очагов

взаимодействия, а в объеме – релаксацией напряжений (в той степени, которая необходима для сохранения образовавшихся связей). При сварке однородных металлов критерием окончания третьей стадии может служить рекристаллизация, приводящая к образованию общих зерен в зоне контакта.

В соответствии с концепцией трехстадийности процесса образования соединения между металлами в твердой фазе следует, что независимо от характера и интенсивности деформационного или термомодеформационного воздействия (т.е. от способа сварки) природа образования соединения едина [28–30]. Различия заключаются в кинетике протекания отдельных стадий процесса, которая определяется температурой, характером и интенсивностью деформации материалов (силового воздействия), степенью локализации деформации и особенностями развития релаксационных процессов в зоне соединения.

В работах [30–32] показано, что наименьшая температура, при которой происходит соединение двух металлов при газопрессовой сварке, т.е. образуются общие зерна в месте стыка, равна 910°C. На рис. 10 показана макроструктура стыка (поз. 1) и микроструктура стыка (поз. 2). Однако цепочка оксидных включений в стыке сохраняется (рис. 10, нижнее изображение, показано стрелками). При температуре нагрева выше 1050–1200°C металлографический стык уже не выделяется, появляются общие зерна, оксидные включения отсутствуют. Сварка с образованием общих зерен в стыке рельса при отсутствии неметаллических включений обеспечивает удовлетворительные механические свойства [30–32].

По мнению авторов работ [31, 32], высокая пластичность и ударная вязкость стыка фиксируется в образцах, сваренных при температуре 1050–1100°C, когда структура шва однородна и не имеет неметаллических включений. С увеличением содержания углерода температурный интервал сварки в твердой фазе уменьшается согласно диаграмме, приведенной в работе



[32]. Повышение ее нижнего предела связано с упрочняющим действием углерода на аустенит. Верхний предел ограничен линией температуры солидуса (на диаграмме – железо-углерод). Оксидные пленки на торцевой поверхности деталей оказывают решающее влияние на процесс образования соединения и его качество при газопрессовой сварке рельса. Они затрудняют межзатомное взаимодействие и препятствуют формированию устойчивых металлических связей. Оксидные пленки должны быть раздроблены и удалены из

зоны соединения в процессе пластической деформации при осадке. Большой объем работ в этом направлении выполнен японскими исследователями [30–32], которые смогли подобрать оптимальные температуры нагрева и последующего осаждения концов рельса при газопрессовой сварке. Все это позволило успешно внедрить данный процесс на предприятиях железнодорожной отрасли Японии⁹ и полностью отказаться от алюминотермитной сварки рельсов (рис. 11).

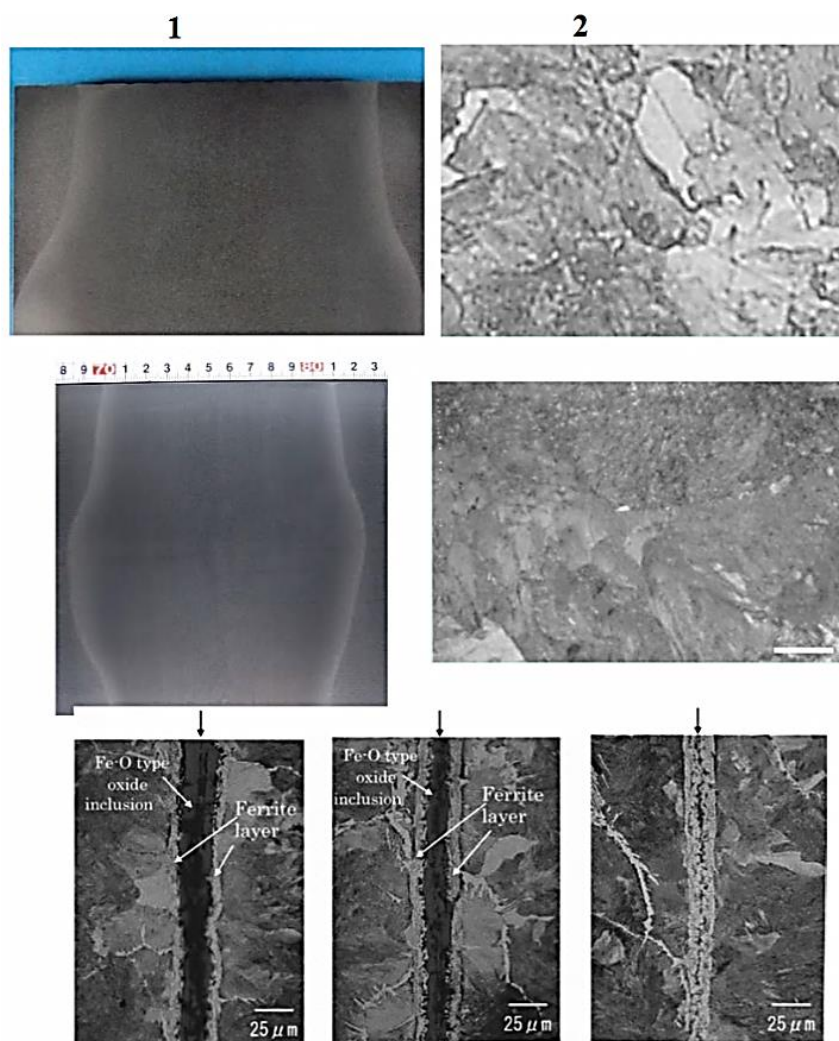


Рис. 10. Макро- и микроструктура сварного стыка после газопрессовой сварки и неметаллические включения в зоне сварного шва
Fig. 10. Macro- and microstructure of the welded joint after gas-pressure welding and non-metallic inclusions in the welded zone

⁹Yamamoto R. Gas pressure welding of rail in Japan // Proc. 6th International Heavy Haul Conf, Cape Town, South Africa, 1997. P. 370–380.

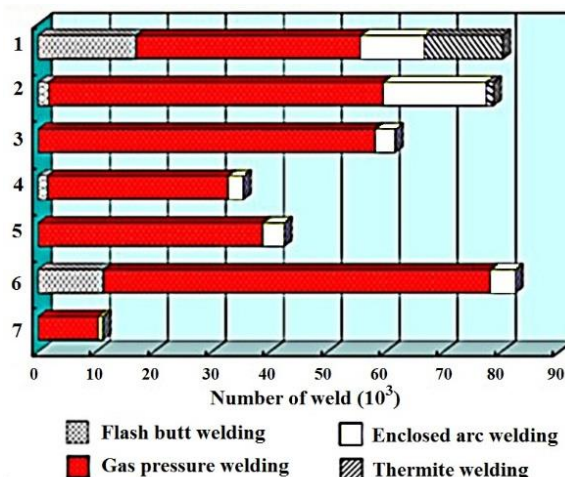


Рис. 11. Динамика использования способов сварки на дорогах Японии
и количество сваренных стыков

1 – Tokaido; 2 – Sanyo; 3 – Tohoku; 4 – Joetsu; 5 – Kyushu; 6 – Hokuriku; 7 – Hokkaido
Fig. 11. Application dynamics of welding methods on Japanese roads
and the number of welded joints:

1 – Tokaido; 2 – Sanyo; 3 – Tohoku; 4 – Joetsu; 5 – Kyushu; 6 – Hokuriku; 7 – Hokkaido

Контактно-стыковая сварка рельсов

Контактно-стыковая сварка рельсов оплавлением происходит в два этапа – нагрев торцов деталей и осадка [33–35]. При сварке оплавлением нагрев контактной области металла происходит в результате расплавления и разрушения локальных перемычек, образующихся при определенной скорости смыкания контактных поверхностей рельсов, вплоть до образования на торцах слоя расплавленного металла. Второй этап сопровождается значительной деформацией нагретых поверхностей в результате резкого увеличения усилия сжатия $F_{ос}$ соединяемых поверхностей, т.е. осадкой. В работах¹⁰ [36–38] проанализированы законы регулирования при разных методах оплавления контактной сварки. Проведен ряд экспериментов по определению зависимости между параметрами сварки и распределением температурных полей в ЗТВ сварного стыка. Анализ температурных изменений при пульсирующем методе оплавления (ПО) в ЗТВ предполагает появление

закалочных структур из-за резкого падения температуры [36–39]. Среднее значение скорости охлаждения при сварке ПО составляет 3,9 °C/c. Анализ температурных полей при сварке непрерывным оплавлением (НО) указывает на медленное изменение температуры охлаждения в цикле сварки по сравнению с методом ПО. Среднее значение скорости охлаждения в ЗТВ при сварке НО составляет 1,7–2,3 °C/c. Анализ металлографического исследования и результаты замера температурных циклов при сварке контактным способом методами непрерывного (рис. 12, поз. 1) и пульсирующего оплавления (рис. 12, поз. 2) рельсов из хромистых сталей повышенной прочности позволил определить критическую скорость охлаждения в цикле сварки [33–35, 39]. При скорости охлаждения выше 3,5°С/с в определенных участках зоны термического влияния образуется смешанная структура, состоящая из пластинчатых сорбитных и мартенситной структур (см. рис.

¹⁰Николин А.И. Совершенствование процессов сварки и термической обработки рельсов магистральных железных дорог: дис. ... канд. техн. наук: 05.15.01; 05.03.06. Москва, 2004. 200 с. / Nikolin A.I. Improvement of welding and thermal treatment of main railroad rails: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.15.01; 05.03.06. Moscow, 2004. 200 p.



12). По линии соединения и примыкающим слоям металла наблюдается крупнозернистая структура первичных аустенитных зерен, балл зерна – 2–3. По границам зерен первичного аустенита четко видна сплошная сетка ферритных выделений, что свидетельствует о низких пластических свойствах этого участка.

По мнению авторов работ [33–39], комбинация двух методов оплавления в циклах процесса нагрева дает возможность управлять размерами характерных областей ЗТВ и термическими циклами в этих областях. Каждый цикл состоит из двух участков нагрева, НО и ПО. Применяя в цикле нагрева непрерывное оплавление, ведется регулирование скоростей охлаждения в ЗТВ, при этом осуществляется

управление более пологой динамикой изменения температуры в этих областях и создаются условия равномерного разогрева торцов рельса [39]. Для достижения необходимой температуры и управления интенсивностью изменения температуры в цикле нагрева применяется метод ПО. Управление термическим циклом сварки при комбинированном методе оплавления позволяет исключить образование мартенситных структур в ЗТВ сварного стыка рельсов из хромистых сталей повышенной прочности¹⁰. При сравнении структур макрошлифов, приведенных на рис. 12, 13, видно, что общая ширина ЭТВ при сварке методом ПО вдвое меньше, чем при сварке с использованием традиционной технологии НО.

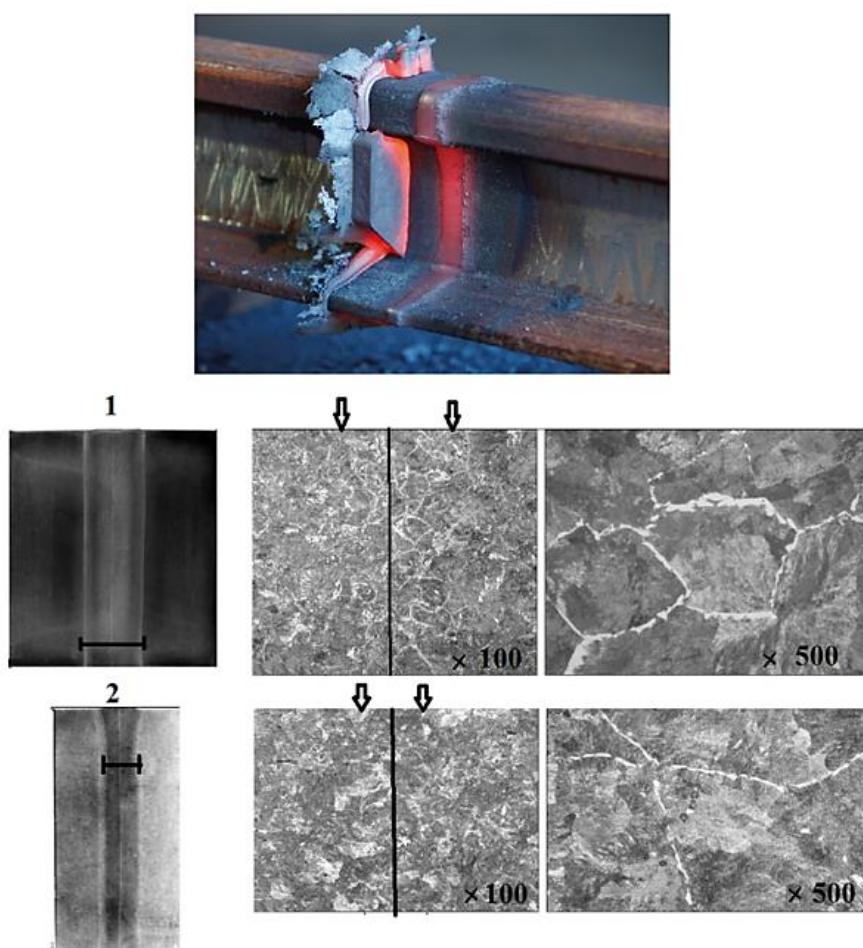


Рис. 12. Макро- и микроструктура рельсового стыка после контактно-стыковой сварки непрерывным (1) и пульсирующим оплавлением (2)
Fig. 12. Macro- and microstructure of the rail joint after contact flash welding by continuous flashing (1) and pulsating flashing (2)

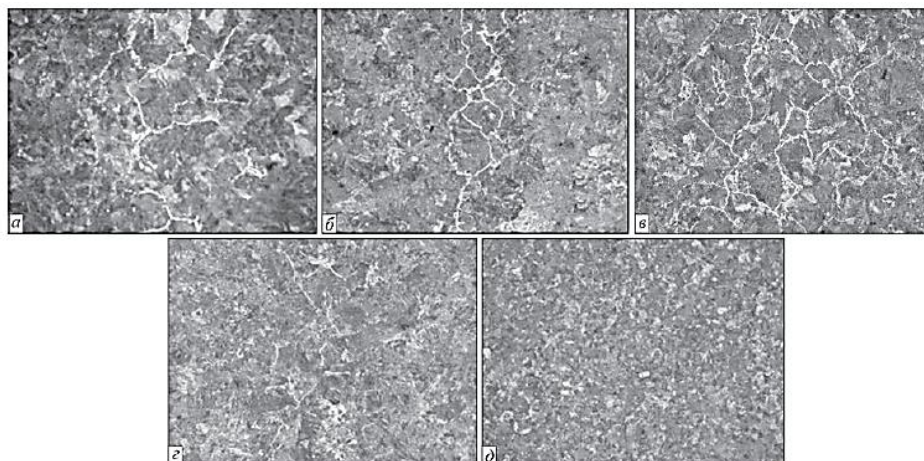


Рис. 13. Микроструктура ($\times 100$) металла ЗТВ сварных соединений:
а – К76Ф (но); б – К76Ф (по); в – 76Ф (по); г – вс-350я (по); д – R350HT (по)
Fig. 13. Microstructure ($\times 100$) of metal of welded joint heat-affected zone:
а – К76F (no); б – К76Ф (po); в – 76Ф (po); г – вс-350я (po); д – R350HT (no)

Показатели механических испытаний на статический изгиб превышают нормативные показатели, установленные нормативной документацией, как по разрушающей нагрузке, так и по прогибу. Из практики контактной сварки известно, что снижение энергозатрат при сварке позволяет улучшить структуру металла по линии соединения и примыкающим участкам, в частности, уменьшить размеры зерен и выделение феррита по их границам. [33–39]. В практической работе рельсосварочных предприятий встречаются дефекты в виде матовых пятен на изломе рельса. По мнению авторов работы [39], причиной снижения пластических свойств в большинстве случаев является формирование в плоскости соединения дефектов, определяемых как «матовые пятна», площадью от 10 до 50 мм². Ими также установлено, что формирование указанных дефектов во многом определяется процессами оплавления, протекающими в финальной его стадии, предусмотренной программой (интенсивным оплавлением, переходящим в осадку). В этот период на торцах оплавленных деталей формируется расплав, в котором всегда имеются продукты его окисления воздухом, содержащиеся из искрового зазора. Если расплав успевает закристаллизоваться до включения этапа сварочного цикла осадки, то полностью его удалить за

счет деформации не удастся. Важно отметить, что при контактно-стыковой сварке оплавлением, когда оксиды находятся преимущественно в слое жидкого металла, их твердость не оказывает влияния на их удаление. Удаление оксидов происходит за счет процессов выброса частиц расплавленного металла из стыка, вытеснения жидкого и твердого металлов в грат при осадке.

Проведенный анализ существующих технологий контактной стыковой сварки и термической обработки сварных стыков выявил их существенные недостатки, связанные с формированием структур в сварных стыках рельсов изготовленных из низколегированных сталей, образованием ожогов в местах контакта с электродами сварочных машин и появлением двух новых зон термического влияния при локальной термической обработке сварных стыков [33–39]. Это приводит к тому, что со сварными стыками связано до трети всех изломов рельсов в пути и до 12,9% всех изъятых остродефектных рельсов (по данным работ [33–39]). Всё это требует оптимизации технических параметров, связанных со сваркой и термической обработкой сварных стыков [40, 41]. Применение комбинированного метода оплавления при контактной сварке рельсов позволяет управлять температурными полями в зоне термического



влияния во время технологического процесса нагрева, что делает возможным регулирование процессом охлаждения в этих зонах сварки. Это позволяет исключить образования мартенситных структур в ЗТВ при контактной сварке рельсов из хромистых сталей повышенной прочности [40, 41]. По мнению авторов работ [40, 41], введение системы подстуживания подошвы рельса при локальной термической обработке сварных стыков рельсов обеспечивает получение в подошве сжимающих напряжений, улучшает геометрию сварных

стыков, что подтверждается результатами замера твердости, металлографическими исследованиями, результатами усталостных испытаний. Проведенное сравнение локальной термической обработки и термической обработки по всей длине сварных рельсов показало, что зона с пониженной твердостью и измененной микроструктурой в зоне сварного стыка значительно уменьшается – от 130 до 6 мм, а снижение твердости уменьшается от 405 до 387 НУ [40, 41].

Линейная сварка трением рельсов

В работах^{11–16}[42] представлено описание машины для линейной сварки трением (LFW) и процесс сварки трением рельсов. Продемонстрирован новый процесс сварки, который улучшил качество сварки по сравнению с традиционными способами соединения рельсов. На первом этапе работ (2012–2016 гг.) авторы определили, что рельс может быть сварен с использованием линейной сварки трением.

После механических испытаний было установлено, что рельсовые стыки имеют хорошие механические свойства по сравнению с основным металлом свариваемых рельсов. Необходимо отметить, что первые экспериментальные результаты, опубликованные в технических отчетах^{11–16}, неизвестны широкому кругу исследователей и поэтому пока не могут быть критически проанализированы научным сообществом.

Результаты анализа технологических способов сварки рельсов с учетом получаемых структур

Подведем итоги анализа технологических способов сварки рельсов с учетом получаемых структур. В настоящий момент разработчики рельсовых сталей на основе многочисленных комплексных исследования сформулировали основные закономерности влияния микроструктуры на эксплуатационные свойства рельсов [43–47]. Так,

например, Шур Е.А. сформулировал принцип однотипной структуры, заключающийся в том, что «...эксплуатационная стойкость рельсов непрерывно повышается с ростом твердости только у группы рельсов с однотипной структурой», при этом наибольшей конструктивной прочностью рельсов, по мнению автора, обладают рельсы либо при

¹¹Gould J., Johnson W. Translational friction weld rail repair – Phase I final report. EWI Project No. 52765GTH, FRA Contract No. DTFR53-11-C-00004.

¹²Shira S. The use of translational friction welding for constructing and repairing rail for high speed and intercity passenger rail – Phase II design report. EWI Project 54368GTH Task 1–3, FRA Contract No. DTFR53-13-C-00041.

¹³Shira S. FRA LFW machine design phase 2 – Loading requirements document. EWI Project 54368GTH Task 1, FRA Contract No. DTFR53-13-C-00041.

¹⁴Shira S. Use of Translational Friction Welding for Constructing and Repairing Rail for High Speed and Intercity Passenger Service Rail. U.S. Department of Transportation, 2016, 40 p.

¹⁵Innovative Welding Processes for New Rail Infrastructures. Available at: <http://www.wrist-project.eu/> (accessed 9 September 2016).

¹⁶Brouzoulis J., Josefson L. Innovative Welding Processes for New Rail Infrastructures, Technical report, Chalmers University of Technology, Gothenburg. 2015.



однородной структуре сорбита закалки максимальной дисперсности с твердостью 331–388 НВ, либо при однородной структуре отпущенного мартенсита или бейнита [43]. Как утверждают авторы работ [44–47], эксплуатационная стойкость рельсов напрямую связана с их твердостью, поэтому развитие рельсового производства должно идти по пути повышения содержания углерода и обеспечения твердости на поверхности катания рельсов на уровне порядка 400 НВ. Такие параметры микроструктуры рельсов, как величина межпластиночного расстояния в перлите, величина перлитных колоний, наличие избыточного феррита, также оказывают большое влияние на свойства рельсов [43]. Известно, что перлитная структура образуется при диффузионном превращении аустенита в широком интервале температур – от ~720 до ~450°C, и имеет вследствие этого различную дисперсность, оцениваемую величиной межпластиночного расстояния, которое может изменяться больше чем на порядок: от ~1,0 до 0,05 мкм. Соответственно изменяется твердость стали и другие характе-

ристики механических свойств. На рис. 14, 15 представлены обобщенные данные по макроструктуре рельсового стыка и твердости, полученные разными способами.

Установлено, что алюминотермитный стык имеет самую большую зону литого металла и зону термического влияния, газопрессовый способ – самую большую зону термических изменений в рельсовой стали. Контактно-стыковая сварка с оплавлением и дуговая сварка имеют минимальные зоны литого металла и ЗТВ по сравнению с вышеуказанными способами. Интересная макроструктура наблюдается при линейной сварке трением: зона литого металла минимальная, а зона термического влияния состоит из нескольких зон. На рис. 15 представлены сравнительные результаты по распределению твердости в сварном стыке при сварке разными способами без термообработки стыка и с обработкой. Видно, что алюминотермитная и газопрессовая сварка имеют провал твердости на большей площади стыка рельса по сравнению с другими способами.

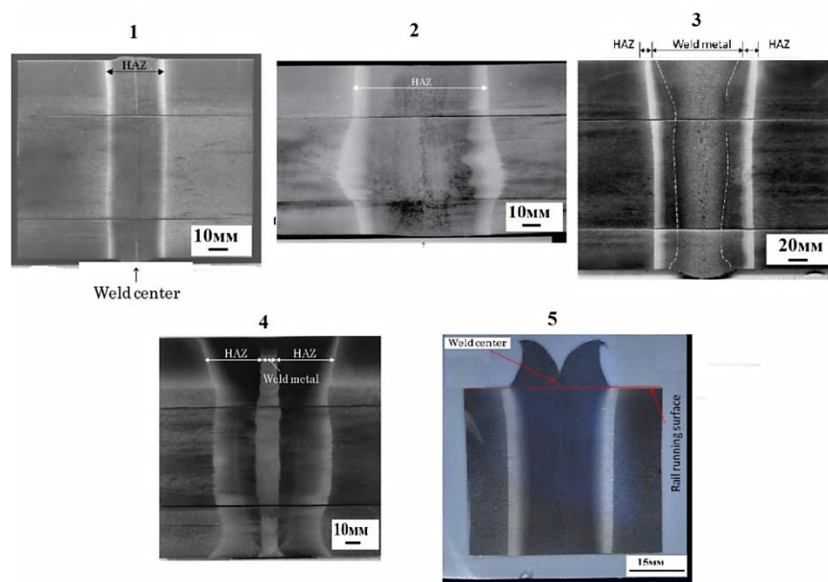


Рис. 14. Макроструктуры, зоны сварки и ЗТВ в зоне сварного стыка рельса, сваренного разными способами: 1 – контактно-стыковая сварка оплавлением; 2 – газопрессовая сварка; 3 – алюминотермитная сварка; 4 – сварка закрытой дугой (Enclosed arc welding); 5 – линейная сварка трением

Fig. 14. Macrostructures, welding zones and heat affected zones in the rail welded joint area welded by different methods: 1 – contact flash welding; 2 – gas-pressure welding; 3 – aluminothermic welding; 4 – enclosed arc welding; 5 – linear friction welding

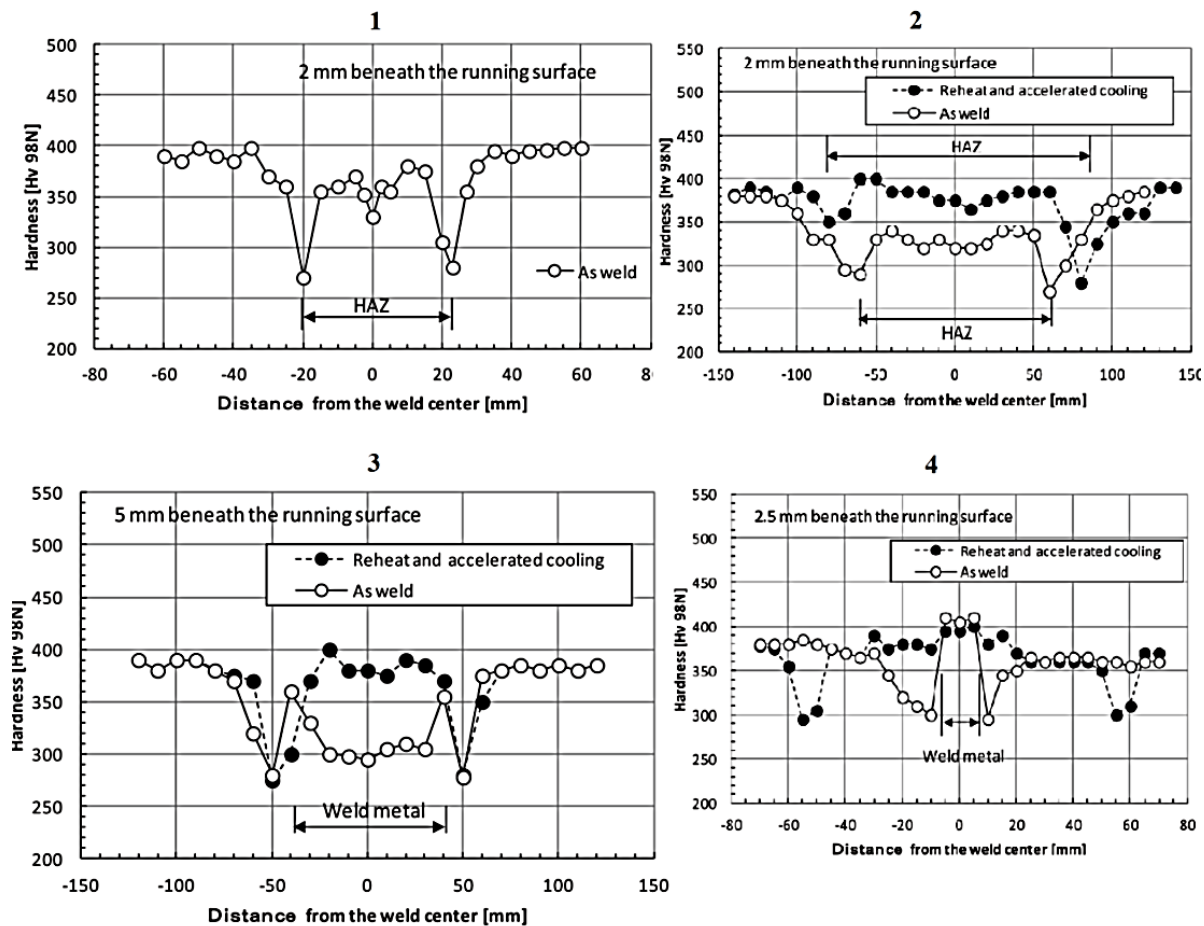


Рис. 15. Распределение твердости в зоне сварного стыка рельса, сваренного различными способами:
1 – контактно стыковая сварка оплавлением; 2 – газопрессовая сварка;
3 – алюмотермитная сварка; 4 – сварка закрытой дугой (Enclosed arc welding)

Fig. 15. Hardness distribution in the welded joint area of the rail welded by different methods:

1 – contact flash welding; 2 – gas-pressure welding;
3 – aluminothermic welding; 4 – enclosed arc welding

Резюмируя все вышесказанное, можно заключить, что принцип эксплуатационной стойкости рельсов, связанный с однородностью структуры по всему сечению рельса, сформулированный Е.А. Шуром, при сварке рельсов контактно-стыковым методом с оплавлением, газопрессовым способом, алюмотермитным способом и закрытой сварочной дугой не выполняется. Однако дополнительная термообработка рельсовых стыков минимизирует последствия высокотемпературного нагрева рельсовых сталей в процессе сварки [40, 41]. Вместе с тем необходимо отметить, что перлитная структура рельсовой стали характеризуется не только величиной межпластиночного расстояния (за данный показатель соперничают метал-

лурги всего мира при производстве рельсов, поскольку это напрямую связано с прочностью), но и с размером колоний, т.е. групп пластин цементита и ферритных промежутков одинаковой пространственной и кристаллографической ориентированности. В объеме исходного аустенитного зерна зарождается и вырастает несколько таких колоний, причем их величина определяется как размером аустенитного зерна, так и температурой превращения аустенита в перлит. Известно [43–47], что размеры перлитных колоний исходного аустенитного зерна существенно влияют на механические свойства перлитной стали, в том числе на вязкость. В тоже время вязкость определяется в основном размером исходного аустенитного зерна, а не размером



колоний перлита, хотя не исключается, что процесс разрушения контролируется структурной составляющей, включающей несколько колоний, имеющих единую кристаллографическую ориентировку ферритной основы. Пластичность перлитной рельсовой стали определяется в основном размером аустенитного зерна [43–47]. Размер исходного аустенитного зерна зависит от температуры аустенитизации, а во всех способах сварки рельса не только скорость охлаждения оказывает большое значение на механизм перлитного превращения, но и скорость нагрева.

Алюминотермитная сварка с позиции простоты осуществления (неуправляемая металлургическая заливка расплавленного металла в рельсовый стык), высокой мобильности, низкой квалификации исполнителей, минимальных трудозатрат подходит только как способ получения функционального материала в рельсовом

стыке, т.е. основное назначение – устранение отказа (причем временное), восстановление рельсовой цепи. Этот способ должен оцениваться как вспомогательный, поскольку с позиции структурного фактора алюминотермитную сварку рельсов *нельзя рекомендовать* при строительстве и реконструкции скоростных бесстыковых путей. Алюминотермитная сварка *как способ получения конструкционного материала* из-за низких значений ударной вязкости и трещиностойкости при отрицательных температурах, высокого уровня дефектообразования в рельсовом стыке не обеспечивает высокое качество рельсового стыка и снижает безопасность движения.

Другие способы сварки рельса по физико-механическим свойствам металла в сварном шве обеспечивают высокое качество рельсового стыка и являются более перспективными.

Заключение

Проведенный авторами настоящей статьи аналитический обзор существующих способов сварки показал, что вопросы структурообразования в рельсовом стыке при сварке разными способами не нашли должного отражения в научной литературе. Здесь нужно установить, что такое функциональный и конструкционный материалы в рельсовом стыке, получаемые в результате сварки, какими свойствами они должны обладать, для достижения каких целей их использовать. Также необходимо определиться с позиции экономической целесообразности применения того или другого способа сварки. Для этих целей провести дополнительные исследования процессов структурообразования в сварочном шве и зоне термического влияния в условиях отрицательных температур и высоких удельных нагрузок на рельсовый стык.

В то же время надо обратить внимание не только на научную, но и на административно-экономическую сторону вопроса.

Специалисты металлургических производств во всем мире затрачивают колоссальные материальные и трудовые ресурсы на разработку и изготовление высокопрочных и износостойких рельсов. Однако железнодорожники в угоду получения максимальной прибыли от перевозок, т.е. просто для обогащения, сводят на нет все положительные свойства рельсовой стали, сознательно и добровольно применяя способы сварки рельсов, существенно ухудшающие эксплуатационные свойства последних и снижающие безопасность движения по железнодорожным путям. Железнодорожникам надо определиться, что для них важнее – безопасность при перевозке грузов и пассажиров или получение прибыли. Надо окончательно расставить приоритеты, так как попытка совмещения двух противоположных целей приносит не только колоссальные убытки по исправлению дефектных стыков, но и снижает безопасность движения.



Библиографический список

1. Штайгер М.Г., Балановский А.Е. Анализ технологий для сварки высокопрочных рельсов с позиции структурообразования при строительстве и реконструкции скоростных железнодорожных магистралей (обзор). Часть 1 // Вестник ИргТУ. 2018. Т. 22. № 6. С. 48–74. DOI: <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-48-74>
2. Малкин Б.В., Воробьев А.А. Термитная сварка рельсов. М.: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1963. 102 с.
3. Каргин В. А., Тихомирова Л.Б., Галай М.С., Кузнецова Е.С. Повышение эксплуатационных параметров соединений, полученных алюминотермитной сваркой // Сварочное производство. 2014. № 2. С. 29–32.
4. Воронин Н.И., Трынкова О.Н., Фомичева О.В. Алюминотермитная сварка рельсов зимой // Мир транспорта. 2012. № 4. С. 56–59.
5. Гудков А.В., Лыков А.М., Кярамян К.А. Расчет процесса алюминотермитной сварки рельсов // Вестник Научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2013. № 2. С. 50–54.
6. Yuan-qing Wang, Hui Zhou, Yong-jiu Shi, Bao-rui Feng. Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature // International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials. 2012. Vol. 19. No. 5. P. 409. DOI: 10.1007/s12613-012-0572-8
7. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R., Structure and properties of thermite welds in rails // Welding Journal. 1982. Vol. 258. P. 8–19.
8. Штайгер М.Г., Лисицын А.И., Палкин С.В., Елкин К.С., Балановский А.Е., Кондратьев В.В., Карлина А.И. Улучшение эксплуатационных свойств рельсов путем снижения совокупности неметаллических включений в рельсовой стали, возникающих вследствие примесей легирующим ферросилиций // Цветные металлы и минералы-2017: сб. докл. IX Международного конгресса (Красноярск, 11–15 сентября 2017 г.). Красноярск: Изд-во ООО «Научно-инновационный центр», 2017. С. 824–831.
9. Штайгер М.Г., Иванчик Н.Н., Лисицын А.И., Карлина А.И. Использование методов сканирующей электронной микроскопии для металлографии рельсовой стали // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 4 (56). С. 189–196.
10. Касаткин О.Г. Особенности водородного охрупчивания высокопрочных сталей при сварке // Автоматическая сварка. 1994. № 1. С. 3–7.
11. Походня И.К., Швачко И.В. Физическая природа обусловленных водородом холодных трещин в сварных соединениях конструкционных сталей // Автоматическая сварка. 1997. № 5. С. 3–12.
12. Гайворонский А.А. Влияние диффузионного водорода на сопротивляемость замедленному разрушению сварных соединений высокоуглеродистой стали // Автоматическая сварка. 2013. № 5. С. 15–21.
13. Позняков В.Д., Кирьяков В.М., Гайворонский А.А., Клапатык А.В., Шишикевич О.С. Свойства сварных соединений рельсовой стали при электродуговой сварке // Автоматическая сварка. 2010. № 8 (688). С. 19–24.
14. Dahl B., Mogard B., Grefott B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding // Svetsaren. 1995. Vol. 50. No. 2. P. 10–14.
15. Bajic D., Kuzmenko G.V., Samardžić I. Welding of rails with new technology of arc welding // Metalurgija. 2013. No. 3. P. 399–402.
16. Altemühl B. Welding tramway rails in Bucharest // Svetsaren. 2002. Vol. 52. No. 2. P. 32–35.
17. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability // Tetsu-to-Hagane. 1984. Vol. 70. No. 10. P. 40–45.
18. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for railroad rails // Nippon Steel Techn. Rept. 1995. Vol. 65. No. 4. P. 41–49.
19. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications // Nippon Steel Techn. Rept. 2000. Vol. 82. No. 7. P. 35–41.
20. Кузьменко Г.В., Кузьменко В.Г., Галинич В.И., Тагановский В.М. Новая технология электродуговой сварки ванным способом рельсов в условиях трамвайных и подкрановых путей // Автоматическая сварка. 2012. № 5 (709). С. 40–44.
21. Sun J., Davis D., Steel R. T.TCI searching for improved in track welding methods // Railway Track & Structures. 2001. №1. P. 13–15
21. Sun J., Davis D., Steel R. T.TCI searching for improved in track welding methods // Railway Track & Structures. 2001. No. 1. P. 13–15.
22. Волошкевич Г.З. Метод принудительного формирования и его применение // Автоматическая сварка. 1951. № 1. С. 3–19.
23. Волошкевич Г.З. Автоматическая сварка кожуха доменной печи // Автоматическая сварка. 1951. № 1. С. 37–51.
24. Светлополянский Ю.И. Полуавтоматическая электрошлаковая сварка рельсов // Автоматическая сварка. 1966. № 3. С. 53–54.
25. Коперман Л.Н., Муканаев К.К. Электрошлаковая сварка крановых рельсов // Сварочное производство. 1967. № 5. С. 32–36.
26. Gutscher D. Development and evaluation of electroslag welding for railroad applications // Railway Track and Structures. 2009. No. 11. P. 53–58.
27. Сварка рельсов на железных дорогах США // Железные дороги мира. 2010. № 3. С. 66–70.
28. Каракозов Э.С. Сварка металлов давлением. М.: Машиностроение, 1986. 276 с.
29. Гельман А.С. Основы сварки давлением. М.: Машиностроение, 1970. 312 с.
30. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining



phenomena of gas pressure welding // *Welding International*. 2014. Vol. 28. Issue 7. P. 510–520.

31. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding // *Welding International*. 2014. No. 7. P. 510–520. DOI: 10.1080/09507116.2012.753237

32. Yamamoto R. Advances in Gas Pressure Welding Technology for Rails. *Railway // Technology Avalanche*. 2007. No. 17. P. 99–105.

33. Кучук-Яценко С.И. Сварка рельсов непрерывным оплавлением // *Автоматическая сварка*. 1964. № 4. С. 55–62.

34. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Кривенко В.Г., Гудков А.В. Контактная стыковая сварка рельсов. Опыт применения и перспективы совершенствования // *Путь и путевое хозяйство*. 2004. № 9. С. 5–8.

35. Кучук-Яценко С.И., Швеи Ю.В., Думчев Е.В., Швеи В.И., Микитин Я.И., Тараненко С.Д., Никитина Н.Н. Контактная стыковая сварка железнодорожных крестовин с рельсовыми окончаниями через промежуточную вставку // *Автоматическая сварка*. 2005. № 1. С. 6–9.

36. Резанов В.А. Методика исследования изменения температуры на различном расстоянии от стыков при сварке рельсов // *Вестник ВНИИЖТ*. 2011. № 4. С. 40–43.

37. Шур Е.А. Резанов В.А. Комплексный метод контактной сварки рельсов // *Вестник ВНИИЖТ*. 2012. № 3. С. 20–22.

38. Шур Е.А., Резанов В.А. Совершенствование контактной сварки рельсов // *Железнодорожный транспорт*. 2013. № 4. С. 58–60.

39. Кучук-Яценко С.И., Дидковский А.В., Швеи В.И., Руденко П.М., Антипин Е.В. Контактная стыковая сварка высокопрочных рельсов современного производства // *Автоматическая сварка*. 2016.

№ 5-6 (753). С. 7–16.

40. Резанов В.А., Федин В.М., Башлыков А.В., Фимкин А.И., Земан С.К. Дифференцированная закалка сварных стыков рельсов // *Вестник ВНИИЖТ*. 2013. № 2. С. 28–34.

41. Андреева Л.А., Федин В.М., Башлыков А.В., Фимкин А.И., Резанов В.А. Термическое упрочнение сварных стыков рельсов на промышленном транспорте // *Промышленный транспорт XXI век*. 2013. № 1. С. 19–20.

42. Ofem U., Addison A., Russell M. Energy and force analysis of linear friction welds in medium carbon steel // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2010. Vol. 15. No. 6. P. 479–482.

43. Шур Е.А. Влияние структуры на эксплуатационную стойкость рельсов // *Влияние свойств металлической матрицы на эксплуатационную стойкость рельсов: материалы II Всерос. Науч.-техн. семинара (Екатеринбург, 16–17 мая, 2006 г.)*. Екатеринбург: Изд-во УИМ, 2006. С. 37–64.

44. Борц А.И., Заграничек К.Л., Долгих Л.В. Результаты сравнительных испытаний рельсов отечественных и зарубежных производителей на контактно-усталостную выносливость // *Улучшение качества и условий эксплуатации рельсов и рельсовых скреплений: сб. докл. по материалам 129-го заседания межотраслевой Рельсовой комиссии*. Екатеринбург: Изд-во ОАО «УИМ». 2013. С. 113–128.

45. Павлов В.В., Темлянец М.В., Корнева Л.В. [и др.]. Дефекты и качество рельсовой стали. М.: Теплотехник, 2006. 218 с.

46. Уэда М., Ивано К., Ямамото Т. Характеристики термоупрочненных рельсов и новейшие разработки Nippon Steel // *Инженерные решения*. 2012. № 1. С. 5–7.

47. Павлов В.В., Темлянец М.В., Корнева Л.В., Сюсюкин А.Ю. Перспективные технологии тепловой и термической обработки в производстве рельсов. М.: Теплотехник, 2007. 280 с.

References

1. Shtaiger M.G., Balanovskii A.E. Analysis of welding technologies of high-strength rails in terms of structure formation under construction and reconstruction of high speed railroads (Review). Part 1. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2018, vol. 22, no. 6, pp. 48–74. DOI: <https://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-6-48-74>.

(In Russian).

2. Malkin B.V., Vorob'ev A.A. *Termitnaya svarka rel'sov* [Thermit welding of rails]. Moscow: Ministry of Communal Services of the Russian Federation Publ., 1963, 102 p. (In Russian).

3. Kargin V. A., Tikhomirova L.B., Galai M.S., Kuznetsova E.S. Performance parameters enhancement of joints obtained by aluminothermic welding. [Welding industry]. 2014, no. 2, pp. 29–32. (In Russian).

4. Voronin N.I., Trynkova O.N., Fomicheva O.V. Aluminothermic welding of rails in winter. *Mir transporta*

[World of transport and transportation]. 2012, no. 4, pp. 56–59. (In Russian).

5. Gudkov A.V., Lykov A.M., Kyaramyan K.A. Calculation of aluminothermic rail welding process. *Vestnik Nauchno-issledovatel'skogo instituta zheleznodorozhnogo transporta* [Vestnik of the Railway Research Institute]. 2013, no. 2, pp. 50–54. (In Russian).

6. Yuan-qing Wang, Hui Zhou, Yong-jiu Shi, Bao-rui Feng. Mechanical properties and fracture toughness of rail steels and thermite welds at low temperature // *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*. 2012. Vol. 19. No. 5. P. 409. DOI: 10.1007/s12613-012-0572-8

7. Myers J., Geiger G.H., Poirier D.R., Structure and properties of thermite welds in rails. *Welding Journal*. 1982, vol. 258, pp. 8–19.

8. Shtaiger M.G., Lisitsyn A.I., Palkin S.V., Elkin K.S., Balanovskii A.E., Kondrat'ev V.V., Karlina A.I.



Uluchshenie ekspluatatsionnykh svoystv rel'sov putem snizheniya sovokupnosti nemetallicheskih vklyuchenii v rel'sovoi stali, vznikayushchikh vsledstvie primesei legiruyushchim ferrosilitsii [Improving operational properties of rails by reducing the amount of nonmetallic inclusions in rail steel arising from impurities of alloying ferrosilicon]. *Sbornik dokladov IX Mezhdunarodnogo kongressa "Tsvetnye metally i mineraly"* [Collection of reports of IX International Congress "Non-Ferrous Metals and Minerals"]. 2017. Krasnoyarsk: OOO «Scientific and Innovatopn Centre» Publ., 2017, pp. 824–831. (In Russian).

9. Shtaiger M.G., Ivanchik N.N., Lisitsyn A.I., Karlina A.I. Using methods of the scanning electron microscopy for metallography rail steels. *Sovremennye tekhnologii. Sistemy analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2017, no. 4 (56), pp. 189–196. (In Russian).

10. Kasatkin O.G. Features of hydrogen embrittlement of high-strength steels at welding. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1994, no. 1, pp. 3–7. (In Russian).

11. Pokhodnya I.K., Shvachko I.V. Physical nature of hydrogen-induced cracks in welded joints of structural steels. *Avtomaticheskaya svarka*. [Automatic welding]. 1997, no. 5, pp. 3–12. (In Russian).

12. Gaivoronskii A.A. Influence of diffusion hydrogen on resistance to slow destruction of high-carbon steel welded joints. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2013, no. 5, pp. 15–21. (In Russian).

13. Poznyakov V.D., Kir'yakov V.M., Gaivoronskii A.A., Klapatyuk A.V., Shishikevich O.S. Properties of rail steel welded joints under electric arc welding. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2010, no. 8 (688), pp. 19–24. (In Russian).

14. Dahl B., Mogard B., Grefot B., Ulander B. Repair of rails on-site by welding. *Svetsaren*. 1995, vol. 50, no. 2, pp. 10–14.

15. Bajic D., Kuzmenko G.V., Samardžić I. Welding of rails with new technology of arc welding. *Metallurgija*. 2013, no. 3, pp. 399–402.

16. Altemühl B. Welding tramway rails in Bucharest. *Svetsaren*. 2002, vol. 52, no. 2, pp. 32–35.

17. Takimoto T. Latest welding technology for long rail and its reliability. *Tetsu-to-Hagane*. 1984, vol. 70, no. 10, pp. 40–45.

18. Okumura M., Karimine K., Uchino K., Yurioka N. Development of field fusion welding technology for railroad rails. *Nippon Steel Techn. Rept.* 1995, vol. 65, no. 4, pp. 41–49.

19. Tachikawa H., Uneta T., Nishimoto H. Steel welding technologies for civil construction applications. *Nippon Steel Techn. Rept.* 2000, vol. 82, no. 7, pp. 35–41.

20. Kuz'menko G.V., Kuz'menko V.G., Galinich V.I., Taganovskii V.M. New technology of rail electric arc welding by the welding bath method in the conditions of tram and crane ways. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2012, no. 5 (709), pp. 40–44. (In Russian).

21. Sun J., Davis D., Steel R. TCI searching for im-

proved in track welding methods. *Railway Track & Structures*. 2001, no. 1, pp. 13–15.

22. Voloshkevich G.Z. Method of forced formation and its application. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1951, no. 1, pp. 3–19. (In Russian).

23. Voloshkevich G.Z. Automatic welding of blast furnace casing. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1951, no. 1, pp. 37–51. (In Russian).

24. Svetlopol'yanskii Yu.I. Semiautomatic electrosag welding of rails. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1966, no. 3, pp. 53–54. (In Russian).

25. Koperman L.N., Mukanaev K.K. Electrosag welding of crane rails. *Svarochnoe proizvodstvo* [Welding]. 1967, no. 5, pp. 32–36. (In Russian).

26. Gutscher D. Development and evaluation of electrosag welding for railroad applications. *Railway Track and Structures*. 2009, no. 11, pp. 53–58.

27. Svarka rel'sov na zheleznykh dorogakh SShA [Welding of rails on US railways]. *Zheleznye dorogi mira* [Railways around the world]. 2010, no. 3, pp. 66–70. (In Russian).

28. Karakozov E.S. *Svarka metallov davleniem* [Pressure welding of metals]. Moscow: Machine-Building Publ., 1986, 276 p. (In Russian).

29. Gel'man A.S. *Osnovy svarki davleniem* [Fundamentals of pressure welding]. Moscow: Machine-Building Publ., 1970, 312 p. (In Russian).

30. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*. 2014, vol. 28, issue 7, pp. 510–520.

31. Yamamoto R., Komizu Y., Fukada Y. Experimental examination for understanding of transition behaviour of oxide inclusions on gas pressure weld interface: joining phenomena of gas pressure welding. *Welding International*. 2014, no. 7, pp. 510–520. DOI: 10.1080/09507116.2012.753237

32. Yamamoto R. Advances in Gas Pressure Welding Technology for Rails. *Railway. Technology Avalanche*. 2007, no. 17, pp. 99–105.

33. Kuchuk-Yatsenko S.I. Continuous flash welding of rails. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 1964, no. 4, pp. 55–62. (In Russian).

34. Kuchuk-Yatsenko S.I., Didkovskii A.V., Krivenko V.G., Gudkov A.V. Flash welding of rails. Application experience and improvement prospects. *Put' i putevye khozyaistvo* [Railway Track and Facilities]. 2004, no. 9, pp. 5–8. (In Russian).

35. Kuchuk-Yatsenko S.I., Shvets Yu.V., Dumchev E.V., Shvets V.I., Mikitin Ya.I., Taranenko S.D., Nikitina N.N. Flash spot welding of railway cross pieces with rail ends through the intermediate insert. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2005, no. 1, pp. 6–9. (In Russian).

36. Rezanov V.A. Methods of studying temperature changes at various distances from joints while rail welding. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute]. 2011, no. 4, pp. 40–43. (In Russian).

37. Shur E.A. Rezanov V.A. Integrated method of con-



tact rail welding. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute]. 2012, no. 3, pp. 20–22. (In Russian).

38. Shur E.A., Rezanov V.A. Improvement of spot welding of rails. *Zheleznodorozhnyi transport* [Railway Transport]. 2013, no. 4, pp. 58–60. (In Russian).

39. Kuchuk-Yatsenko S.I., Didkovskii A.V., Shvets V.I., Rudenko P.M., Antipin E.V. Spot flash welding of high-strength rails of modern production. *Avtomaticheskaya svarka* [Automatic welding]. 2016, no. 5-6 (753), pp. 7–16. (In Russian).

40. Rezanov V.A., Fedin V.M., Bashlykov A.B., Fimkin A.I., Zeman S.K. Differentiated heat treatment of welded rail joints. *Vestnik VNIIZhT* [Vestnik of the Railway Research Institute]. 2013, no. 2, pp. 28–34. (In Russian).

41. Andreeva L.A., Fedin V.M., Bashlykov A.V., Fimkin A.I., Rezanov V.A. Thermal strengthening of welded joints of rails on industrial transport. *Promyshlennyy transport XXI vek* [Industrial transport of the XXI century]. 2013, no. 1, pp. 19–20. (In Russian).

42. Ofem U., Addison A., Russell M. Energy and force analysis of linear friction welds in medium carbon steel // *Science and Technology of Welding and Joining*. 2010, vol. 15, no. 6, pp. 479–482.

43. Shur E.A. *Vliyaniye struktury na ekspluatatsionnyuyu stoikost' rel'sov* [Influence of structure on rail operational stability]. *Materialy II Vserossiiskogo nauchno-tekhnicheskogo seminara "Vliyaniye svoystv metallicheskoi matritsy na ekspluatatsionnyuyu stoikost' rel'sov"* [Proceedings of II All-Russian scientific and

technical seminar "Influence of metal matrix properties on operational stability of rails"]. Ekaterinburg: Ural Institute of Metals Publ., 2006, pp. 37–64. (In Russian).

44. Borts A.I., Zagranichek K.L., Dolgikh L.V. *Rezultaty sravnitel'nykh ispytaniy rel'sov otechestvennykh i zarubezhnykh proizvoditelei na kontaktno-ustalostnuyu vyнослиvost'* [Comparative test results of rails produced by domestic and foreign manufacturers for contact fatigue endurance]. *Sbornik dokladov po materialam 129-go zasedaniya mezhotraslevoi Rel'sovoi komissii "Uluchsheniye kachestva i uslovii ekspluatatsii rel'sov i rel'sovykh skreplenii"* [Collection of articles on the materials of 129th meeting of the interbranch Rail Commission "Improving the quality and operating conditions of rails and rail fastenings"]. Ekaterinburg: Ural Institute of Metals Publ., 2013, pp. 113–128. (In Russian).

45. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V. [et al]. *Defekty i kachestvo rel'sovoi stali* [Defects and quality of rail steel]. Moscow: Teplotekhnika Publ., 2006, 218 p. (In Russian).

46. Ueda M., Ivano K., Yamamoto T. Characteristics of heat-strengthened rails and the newest developments of Nippon Steel. *Inzhenernye resheniya* [Engineering solutions]. 2012, no. 1, pp. 5–7. (In Russian).

47. Pavlov V.V., Temlyantsev M.V., Korneva L.V., Syusyukin A.Yu. *Perspektivnye tekhnologii teplovoi i termicheskoi obrabotki v proizvodstve rel'sov* [Promising technologies of thermic and heat treatment in the production of rails]. Moscow: Teplotekhnika Publ., 2007, 280 p. (In Russian).

Критерии авторства

Штайгер М.Г., Балановский А.Е. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Shtaiger M.G., Balanovsky A.E. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.832

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-69-87>

МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ КОМБИНАТОРНОГО ПОИСКА НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ КАЧЕСТВЕННЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ В ЗАДАЧАХ УДОВЛЕТВОРЕНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ

© А.А. Зуенко¹

Институт информатики и математического моделирования – обособленное подразделение Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук» (ИИММ КНЦ РАН), 184209, Российская Федерация, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24а.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Актуальность представленных исследований определяется важностью моделирования слабо формализованных предметных областей, знания о которых разнородны, носят как количественный, так и качественный характер. С появлением технологии программирования в ограничениях появились предпосылки для унификации совместной обработки разнородных ограничений предметной области, однако, на настоящий момент обработка качественных зависимостей реализуется недостаточно эффективно. Статья посвящена разработке способов экономного представления нечисловых ограничений, а также эффективных методов их удовлетворения. Исследования направлены на ускорение процедур комбинаторного поиска при решении задач удовлетворения ограничений в слабо формализованных предметных областях. **МЕТОДЫ.** Предлагаемые методы развивают теорию удовлетворения ограничений в части представления и повышения эффективности совместной обработки количественных и качественных зависимостей слабо формализованной предметной области. Для представления и обработки нечисловых (качественных) ограничений предметной области предполагается использовать специализированные матрицеподобные структуры (C- и D-системы), а рассуждения на данных структурах реализовывать в форме процедур удовлетворения ограничений. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Сформулированы две теоремы о свойствах матрицеподобных структур и следствия из них, которые в совокупности с предлагаемыми правилами редукции позволяют успешно распространять нечисловые ограничения: выявлять в пространстве поиска подпространства допустимых и недопустимых присваиваний, проверяя лишь часть значений из области определения переменной. На основе следствий из упомянутых теорем разработаны модификации известных методов распространения ограничений, обеспечивающие достижение вершинной и дуговой совместностей для случая нечисловых ограничений. Данные модификации, в отличие от большинства аналогов, позволяют эффективно редуцировать задачу CSP, даже если она изначально не была представлена посредством совокупности лишь унарных и бинарных ограничений. **ВЫВОДЫ.** В работе предложен комплексный подход к представлению и обработке качественных зависимостей в слабо формализованных предметных областях, позволяющий обеспечить приемлемую скорость вычислений при исследовании предметных областей со сложными многочисленными связями.

Ключевые слова: теория удовлетворения ограничений, распространение ограничений, матрицеподобные структуры, нечисловые ограничения, алгоритмы достижения совместности, нечисловые ограничения над конечными доменами.

Информация о статье. Дата поступления 04 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 04 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Зуенко А.А. Методы ускорения комбинаторного поиска на основе матричного представления качественных зависимостей в задачах удовлетворения ограничений // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 69–87. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-69-87

METHODS FOR ACCELERATING COMBINATORIAL SEARCH BASED ON MATRIX REPRESENTATION OF QUALITATIVE RELATIONSHIPS IN CONSTRAINT SATISFACTION PROBLEMS

A.A. Zuenko

¹Зуенко Александр Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, e-mail: zuenko@iimm.ru

Alexander A. Zuenko, Candidate of technical sciences, Senior Researcher, e-mail: zuenko@iimm.ru



Institute of Informatics and Mathematical Modeling – a separate subdivision of the Federal State Budgetary Institution of the Federal Research Center “Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences” (IIMM KSC RAS), 24a, Fersman St., Apatity, 184209, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The relevance of the presented studies is determined by the importance of modeling of poorly formalized subject domains, the knowledge of which is heterogeneous and has both quantitative and qualitative nature. With the advent of constraint programming technology the conditions for unifying the joint processing of heterogeneous constraints of the subject domain have emerged. However, today qualitative dependencies are not processed effectively enough. The article is devoted to the development of methods for economical representation of non-numerical constraints, as well as effective methods for their satisfaction. The research is aimed at acceleration of the combinatorial search procedures when solving constraint satisfaction problems in poorly formalized subject domains. **METHODS.** The methods proposed in the article develop the constraint satisfaction theory in the part of representing and improving the efficiency of joint processing of quantitative and qualitative relationships of a poorly formalized subject domain. Presentation and processing of non-numerical (qualitative) constraints of the subject domain is proposed to perform with the use of specialized matrix-like structures (C- and D-systems). The reasoning on these structures should be implemented in the form of constraint satisfaction procedures. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Two theorems on the properties of matrix-like structures and their corollaries are formulated. Together with the proposed reduction rules they can successfully propagate non-numerical constraints: identify the subspaces of legal and illegal assignments in the search space by checking only a part of the values from the variable domain. Based on the corollaries of the theorems mentioned above, the modifications are developed to the known methods of constraint propagation, which provide node and arc consistency for the case of non-numerical constraints. Unlike most analogs these modifications allow the CSP to be effectively reduced, even if it was not originally represented by a set of unary and binary constraints only. **CONCLUSIONS.** The paper offers a complex approach to the representation and processing of qualitative dependencies in poorly formalized subject domains, which allows to provide an acceptable computational speed in the study of subject domains with complicated multiple relationships.

Keywords: *constraint satisfaction theory, constraint propagation, matrix-like structures, non-numerical constraints, consistency algorithms, non-numeric constraints over finite domains*

Information about the article. Received April 04, 2018; accepted for publication June 04, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Zuenko A.A. Methods for accelerating combinatorial search based on matrix representation of qualitative relationships in constraint satisfaction problems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 69–87. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-69-87 (In Russian).

Введение

Актуальность исследований, представленных в статье, определяется важностью моделирования слабо формализованных предметных областей, знания о которых разнородны, носят как количественный, так и качественный характер. Качественные соотношения (многочесные отношения, логические формулы, экспертные правила и т.п.), описывающие еще до конца не изученные аспекты функционирования системы, органично дополняют аналитические закономерности, уже известные для полностью изученных фрагментов системы. К тому же размерность решаемых задач может быть достаточно большой, что обуславливает применение специализированных методов ускорения вычислительных процедур.

По мнению автора, в рамках технологии программирования в ограничениях имеются предпосылки для унификации способов представления разнородной информации и повышения эффективности совместной обработки качественной и количественной информации.

Программирование в ограничениях – это мощная парадигма для решения задач комбинаторного поиска, которая интегрирует широкий спектр методов таких направлений исследований, как: искусственный интеллект, computer science, исследование операций, математическая логика, теория графов, теория алгоритмов и т.д.

Ключевым понятием данной парадигмы является понятие ограничения, которое трактуется довольно широко. Под ограничением понимается любое соотношение между переменными предметной области. В качестве ограничений могут выступать арифметические выра-



жения (в частности, линейные уравнения/неравенства); логические формулы; таблицы; выражения, формулируемые на языке специализированных теорий (например, теории графов, теории конечных автоматов и т.п.).

Технология программирования в ограничениях позволяет представлять модель задачи в декларативном стиле на языке, близком к языку математики. Для применения рассматриваемой технологии необходимо, чтобы прикладная задача была сформулирована в виде задачи удовлетворения ограничений.

Согласно [1] *задача удовлетворения ограничений* (Constraint Satisfaction Problem) состоит из трех компонент – X, D, C :

- X – множество переменных $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$;
- D – множество доменов $\{D_1, D_2, \dots, D_n\}$, где D_i является доменом переменной X_i ;
- C – множество ограничений $\{C_1, C_2, \dots, C_m\}$, которые предписывают допустимые комбинации значений переменных.

Каждый домен D_i описывает множество допустимых значений $\{v_1, \dots, v_k\}$ для переменной X_i . Каждое ограничение есть пара $\langle \text{scope}, \text{rel} \rangle$, где scope – множество переменных, которые участвуют в ограничении, а rel – отношение, регламентирующее допустимые комбинации значений, которые переменные из scope могут принимать.

Ограничения могут быть представлены эксплицитно, то есть путем перечисления всех допустимых комбинаций значений для указанного набора переменных, а могут быть представлены имплицитно, в форме абстрактного отношения, поддерживающего две операции: проверка на принадлежность некоторого кортежа данному отношению, перечисления всех элементов отношения. Второй способ, по сути, требует указания характеристической функции данного отношения.

Состояние задачи описывается как *присваивание* значений некоторым (*частичное присваивание*) или всем переменным (*полное присваивание*): $\{X_i = v_i, X_j = v_j, \dots\}$. *Решением задачи CSP является полное присваивание, которое удовлетворяет всем ограничениям.*

Далее нас будут интересовать только задачи удовлетворения ограничений с конечными областями определения переменных.

В теории удовлетворения ограничений для ограничений над конечными доменами (областями определения переменных) разработаны специализированные алгоритмы, направленные на решение задач комбинаторного поиска [2]. Однако, как и в случае бесконечных доменов, эти ограничения обычно носят характер числовых зависимостей и задаются с помощью базового набора арифметических операций, бинарных отношений равно/неравно, больше/меньше, встроенных функций и т.п., для которых разработаны специализированные процедуры-пропагаторы. Принципиальное отличие качественных ограничений от количественных (числовых) состоит в том, что переменные даже в рамках одного ограничения могут иметь различные типы, а сами ограничения, как правило, не являются бинарными. Существующие на данный момент в теории удовлетворения ограничений методы удовлетворения нечисловых ограничений с конечными доменами недостаточно эффективны.

Недостаточная проработка подобных методов ограничивает возможности решения различных прикладных задач анализа систем со сложными многочисленными связями. Данная работа посвящена разработке компактного («сжатого») представления нечисловых ограничений, позволяющего снизить расход памяти компьютера на представление задачи, а также созданию эффективных методов распространения качественных ограничений, использующих преимущества упомянутого представления.

В статье предлагается качественные зависимости представлять в виде матриц ограничений (C - и D -систем), а вывод на C - и D -системах выполнять с помощью авторских методов распространения нечисловых ограничений.



Возможности унификации представления и обработки количественных и качественных ограничений в рамках парадигмы удовлетворения ограничений

Процесс вывода на ограничениях сводится к поэтапному усечению изначально заданных областей определения переменных. Любой метод удовлетворения ограничений должен проектироваться особым образом и состоять из двух основных частей: части, реализующей поиск, и части, реализующей вывод на ограничениях.

Начнем с описания части, отвечающей за вывод. Как правило, под выводом на ограничениях понимается процесс сокращения размерности пространства поиска, обеспечивающий «сужение» доменов переменных, упрощение ограничений и т.п., при этом имеющий низкую вычислительную сложность (оценивается полиномом низкой степени). Алгоритмы, реализующие вывод на ограничениях, называются *алгоритмами-распространителями* или *алгоритмами-пропагаторами*. Данные алгоритмы исключают из областей определения переменных заведомо лишние значения, то есть значения, которые не входят ни в одно из допустимых присваиваний. Завершение алгоритмов-распространителей может произойти с тремя возможными исходами. Во-первых, в результате работы алгоритмов-распространителей может быть получено решение исходной задачи CSP: все домены переменных сужаются до одноэлементных множеств. Во-вторых, может быть установлено, что область определения некоторой переменной пуста, и тогда решения соответствующей задачи CSP не существует. Наконец, алгоритмы-распространители могут остановиться, достигнув некоторой неподвижной точки, а решение задачи CSP еще не получено. В этом случае в дело вступают методы, реализующие стратегии интеллектуального поиска. Эти методы, в отличие от методов вывода, имеют существенную вычислительную сложность, поскольку сопряжены с перебором вариантов гипотез о возможных значениях тех или иных переменных. В отличие от методов динамического программирования, например, метода перемножения числовых матриц (*matrix multiplication method*), в качестве стратегий поиска в рамках парадигмы программирования в ограничениях используются в основном различные варианты информированного поиска в глубину с возвратами, а также методы локального поиска.

Архитектура систем программирования в ограничениях напоминает архитектуру вычислительных машин (рис. 1). В качестве своеобразной шины данных в системах программирования в ограничениях выступает так называемое хранилище ограничений, представляющее собой помимо собственно ограничений список пар «переменная – перечень значений переменной, которые она может принимать на текущем этапе вывода». Аналогом центрального процессора выступает алгоритм-дирижер (управляющая подпрограмма), реализующий базовую стратегию поиска.

В качестве сопрограмм выступают подпрограммы, реализующие вывод на ограничениях, – распространители ограничений. Для различных типов ограничений и типов областей определения переменных разрабатываются различные алгоритмы-распространители. В частности, для арифметических и логических ограничений целесообразно иметь различные алгоритмы-распространители, учитывающие специфику данных типов ограничений. Продолжая аналогию с архитектурой вычислительных машин, процедуры-распространители соотносятся с дополнительными устройствами (оперативная память, жесткий диск и т.п.), достаточно гибко подключаемыми через шину данных. Кроме стандартных типов ограничений и алгоритмов-распространителей в рамках библиотек программирования в ограничениях существует возможность создания пользовательских типов ограничений и соответствующих процедур распространения. В частности, автором были введены новые типы ограничений – *C*- и *D*-системы, а также созданы высокоэффективные методы рассуждений на данных структурах, которые подробно описаны ниже.

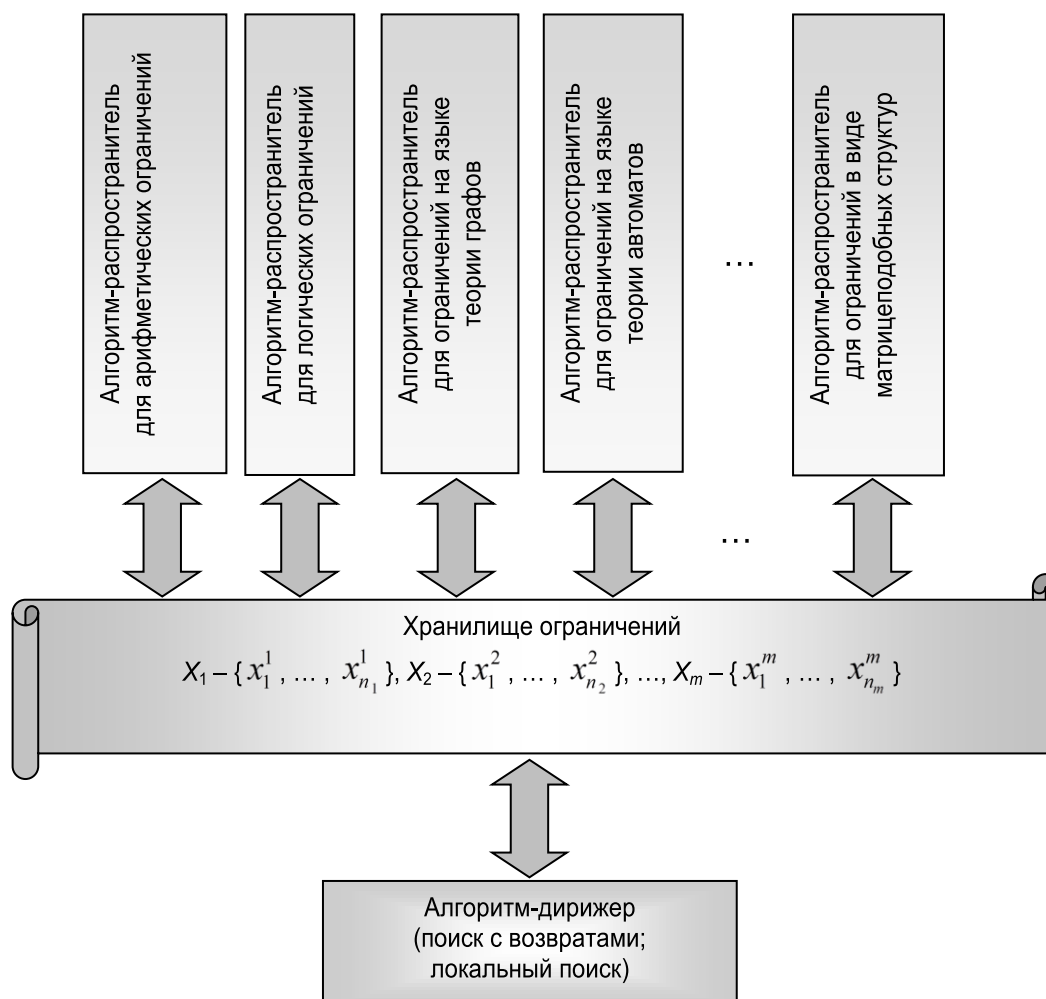


Рис. 1. Архитектура системы программирования в ограничениях
Fig. 1. Architecture of the constraint-based programming system

Пользователь-программист может изменять логику управляющей программы, в частности, в случае поиска с возвратами пользователь может задавать эвристики для выбора на текущем шаге переменной, а также значения самой переменной. Могут задаваться действия, выполняемые в случае обнаружения тупиковой вершины и т.п.

В процессе решения конкретной задачи CSP используется следующий механизм активации ограничений (соответствующих процедур-распространителей) по событиям: ограничение активируется, если домен какой-либо переменной, которая входит в данное ограничение, был усечен. Также при активации ограничений имеются определенные приоритеты: сначала активируются более простые ограничения, затем – более сложные, то есть содержащие большее количество переменных. Так, обычно сначала активируются унарные ограничения, затем бинарные и т.д. Дело в том, что для простых ограничений (унарных, бинарных, редко используемых тернарных) алгоритмы их распространения имеют низкую вычислительную сложность.

Именно особенности архитектуры систем программирования в ограничениях создают предпосылки для унификации совместной обработки разнородной (количественной и качественной) информации (ограничений). Однако на практике эффективность процедур подобной совместной обработки страдает из-за отсутствия высокопроизводительных процедур-распространителей для качественных ограничений.

Теперь перейдем к описанию авторских методов вывода на нечисловых ограничениях.



Матрицеподобные структуры для представления ограничений

В математике для представления зависимостей предметной области нет более общего понятия, чем понятие многоместного отношения. Многоместное отношение – это множество кортежей, являющихся подмножеством определенного декартова произведения множеств. В информационных системах отношения представляются таблицами. Каждая ячейка таблицы содержит конкретное значение переменной, строка таблицы – это комбинация значений.

Отношение может быть выражено более компактно, чем полным перечислением своих кортежей. Любое отношение может быть представлено как объединение декартовых произведений некоторых множеств. Эта мысль наглядно проиллюстрирована на рис. 2, где слева показано отношение, записанное в виде обычной таблицы, а справа – «сжатая» форма записи многоместного отношения в виде специализированной матрицы.

X	Y	
c	1	
c	2	
c	4	
c	5	
b	2	
b	4	
d	1	
d	5	

a

X	Y
$\{c\}$	$\{1,2,4,5\}$
$\{b\}$	$\{2,4\}$
$\{d\}$	$\{1,5\}$

b

Рис. 2. A – табличное представление ограничения; b – представление ограничения в виде специализированной матрицы

Fig. 2. A – Table representation of the constraint;

b – representation of the constraint in the form of the specialized matrix

Здесь области определения переменных: $X = \{a, b, c, d\}$; $Y = \{1, 2, 3, 4, 5\}$,

Фактически при матричной записи на рис. 2, b между компонентами одной строки опускается знак операции $\times$ (декартово произведение), а между строками явно не записывается знак операции $\cup$ (объединение множеств).

Предлагаемый математический аппарат для «сжатого» представления многоместных отношений использует два типа матрицеподобных структур [3, 4]. Первый вид матрицеподобных структур – это C-системы. C-система – это нечисловая матрица, где в качестве ячеек выступают не отдельные элементы, а множества.

Распишем C-систему, представленную на рис. 2, b, в явном виде, то есть в форме алгебраического выражения над множествами:

$$T[XY] = \begin{bmatrix} \{c\} & \{1, 2, 4, 5\} \\ \{b\} & \{2, 4\} \\ \{d\} & \{1, 5\} \end{bmatrix} = \{c\} \times \{1, 2, 4, 5\} \cup \{b\} \times \{2, 4\} \cup \{d\} \times \{1, 5\}.$$

Графически каждый C-кортеж соответствует некоторой области в признаковом пространстве (декартову произведению множеств), а вся C-система – объединению этих областей (рис. 3, a). Различная штриховка на рисунке соответствует различным кортежам C-системы $T[XY]$: вертикальная штриховка соответствует первой строке C-системы, горизонтальная – второй строке, диагональная – третьей строке.

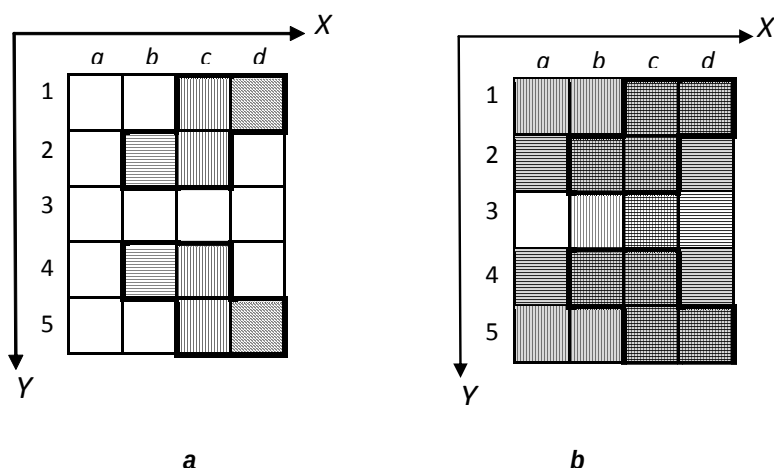


Рис 3. Графическое представление С-системы (а) и D-системы (b)
Fig. 3. Graphical representation of C-system (a) and D-system (b)

Другой вид матрицеподобных структур, обеспечивающий компактное представление многоместных отношений, – это D-система. Данная матрица записывается в обратных скобках. Ниже приводится D-система $P[XY]$, которая эквивалентна рассмотренной ранее С-системе $T[XY]$ в том смысле, что обе структуры описывают одну и ту же таблицу, представленную на рис 2, а:

$$P[XY] = \begin{bmatrix} \{c, d\} & \{2, 4\} \\ \{b, c\} & \{1, 5\} \\ \emptyset & \{1, 2, 4, 5\} \end{bmatrix} = (\{c, d\} \times \{1, 2, 3, 4, 5\} \cup \{a, b, c, d\} \times \{2, 4\}) \cap (\{b, c\} \times \{1, 2, 3, 4, 5\} \cup \{a, b, c, d\} \times \{1, 5\}) \cap (\{a, b, c, d\} \times \{1, 2, 4, 5\}).$$

D-система также расшифровывается как сложное алгебраическое выражение. Каждая строка D-системы описывает область в признаковом пространстве, которая имеет более сложную структуру, чем декартово произведение (по сути это объединение декартовых произведений). Вся D-система есть пересечение областей, соответствующих отдельным строкам (рис. 3, b). Здесь горизонтальная штриховка соответствует первой строке D-системы $P[XY]$, вертикальная – второй строке, а выделение цветом – третьей строке D-системы.

С помощью С-систем удобно моделировать дизъюнктивные нормальные формы (ДНФ) конечных предикатов. Продемонстрируем это на примере. Пусть задан конечный предикат:

$$\varphi(x, y, z) = (x=a, b) \wedge (y=a, c) \vee (z=d).$$

Для простоты все переменные определены на множестве $\{a, b, c, d\}$. Здесь и далее будем использовать запись вида $(x = a, b)$ для обозначения выражения $(x = a) \vee (x = b)$. Учитывая, что область истинности одноместного предиката $(x = a, b)$ есть $\{a, b\}$, то область истинности предиката $\varphi(x, y, z)$ может быть представлена в виде следующей С-системы:

$$R[XYZ] = \begin{bmatrix} \{a, b\} & \{a, c\} & * \\ * & * & \{d\} \end{bmatrix}.$$

Атрибуты X, Y, Z отношения $R[XYZ]$ соответствуют переменным x, y, z формулы



$\varphi(x, y, z)$. Заметим, что «*» – сокращенное обозначение всего диапазона возможных значений (домена) атрибута. С-систему $R[XYZ]$ можно преобразовать в многоместное отношение следующим образом: $(\{a, b\} \times \{a, c\} \times \{a, b, c, d\}) \cup (\{a, b, c, d\} \times \{a, b, c, d\} \times \{d\})$.

С помощью D -систем моделируются конъюнктивные нормальные формы (КНФ) конечных предикатов. D -система записывается как матрица компонент-множеств, которые заключены в перевернутые скобки. D -системы позволяют легко вычислять дополнение С-систем: берется дополнение для каждой компоненты-множества.

Например, предикат $\neg\varphi \equiv (\neg(x = a, b) \vee \neg(y = a, c)) \wedge \neg(z = d)$, что с учетом конечных областей определения переменных равносильно $\neg\varphi \equiv ((x = c, d) \vee (y = b, d)) \wedge (z = a, b, c)$. Предикат $\neg\varphi$ может быть выражен как D -система $\bar{R}[XYZ]$:

$$\bar{R}[XYZ] = \begin{bmatrix} \{c, d\} & \{b, d\} & \emptyset \\ \emptyset & \emptyset & \{a, b, c\} \end{bmatrix}.$$

Пустая компонента « $\emptyset$ » – это фиктивная компонента, не содержащая значений.

В настоящей работе сформулированы две теоремы (для D -систем), лежащие в основе описанных ниже методов локального поиска.

В D -системе со схемой S и множеством номеров кортежей $\{n_m\}$ выберем некоторый атрибут X (X входит в схему S) с доменом $D_X = \{a_k\}$. Для значений из D_X введем отношение частичного порядка « $\leq$ » следующим образом: $a_i \leq a_j$, тогда и только тогда, когда $\{n_i\} \subseteq \{n_j\}$, где $a_i, a_j \in D_X$; а $\{n_i\} \subseteq \{n_m\}$ и $\{n_j\} \subseteq \{n_m\}$ есть множества номеров строк (кортежей) D -системы, компоненты которых в атрибуте X содержат значения a_i и a_j , соответственно.

Например, пусть в пространстве $S = \{a, b, c\} \times \{d, e, f\} \times \{h, g, k\}$ имеется D -система:

$$\begin{array}{ccc} X & Y & Z \\ \{a, b, c\} & \{d, e, f\} & \{h, g, k\} \\ \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{array} \begin{bmatrix} \{c\} & \{d, e\} & \{h\} \\ \{a\} & \{e\} & \{g\} \\ \emptyset & \{f\} & \{h\} \\ \emptyset & \{f\} & \{k\} \end{bmatrix} \end{array}.$$

Для удобства объяснения здесь и далее в верхних двух строках D -системы записываются имена атрибутов и множества допустимых значений этих атрибутов (домены атрибутов), а строки D -системы пронумерованы.

Выберем атрибут Y . Множество $\{n_i\}$ строк D -системы, содержащих в компонентах Y значение d , представляет собой одноэлементное множество – $\{1\}$. Для значения e множество строк – $\{1, 2\}$.

Поскольку $\{1\} \subseteq \{1, 2\}$, то $d \leq e$.

Теорема 1. Если некоторое значение a_j атрибута X входит в недопустимое присваивание, то при замене этого значения на другое значение a_i атрибута X , такое, что $a_i \leq a_j$, также получится недопустимое присваивание.

Пусть для приведенной в примере D -системы получено частичное решение: $Y - \{e\}$. Это решение является недопустимым, то есть ни один элемент из подпространства $\{a, b, c\} \times \{e\} \times \{h, g, k\}$ не является решением поставленной CSP. Вспомним, что $d \leq e$. Тогда, по теореме 1 из пространства поиска $S = \{a, b, c\} \times \{d, e, f\} \times \{h, g, k\}$ можно исключить область $\{a, b, c\} \times \{d, e\} \times \{h, g, k\}$. Другими словами, домен переменной Y сужается до одноэлементного множества $\{f\}$, и решение (если оно существует) следует искать в подпространстве $\{a, b, c\} \times \{f\} \times \{h, g, k\}$.

Теорема 2. Если некоторое значение a_i атрибута X входит в допустимое присваивание, то при замене этого значения на другое значение a_j атрибута X , такое, что $a_i \leq a_j$, также получится допустимое присваивание.

Если получено некоторое решение задачи CSP, то на основе теоремы 2, проанализировав одно конкретное решение, иногда удастся выделить подпространство в пространстве допустимых присваиваний.

Далее в кратком изложении приведем упомянутые методы решения задач CSP, опишем используемые эвристики и применяемые правила редукции пространства поиска.

Методы удовлетворения ограничений

Как известно, алгоритмы распространения ограничений позволяют свести исходную задачу CSP – $\langle X, D, C \rangle$, к более простой задаче – $\langle X', D', C' \rangle$, где каждая область определения переменных в D' является подмножеством соответствующей области в D , а ограничения C' содержат то же множество решений CSP, что и ограничения C , но вид ограничений C' , как правило, существенно проще. Наиболее популярными в теории удовлетворения ограничений являются методы, обеспечивающие вершинную совместность (Node Consistency – NC) и дуговую совместность (Arc Consistency – AC) [5, 6]. При этом полагается, что переменным соответствуют вершины некоторого графа, а бинарным ограничениям – его дуги. Строгое определение понятия совместности громоздко, поэтому здесь не приводится.

Далее предлагаются модификации этих алгоритмов, опирающиеся на свойства упомянутых матричных структур. Разработанные автором методы позволяют существенно ускорить достижение вершинной и дуговой совместностей по сравнению с прототипами, основанными на табличном представлении ограничений.

Будем считать, что задача удовлетворения ограничений $\langle X, D, C \rangle$ описывается в виде единственной D -системы, где каждая строка соответствует определенному ограничению, каждая переменная соотносится с некоторым атрибутом D -системы (столбцом D -системы), а область определения переменной отвечает домену соответствующего атрибута.

В качестве примера возьмем один из вариантов задачи «Магический квадрат».

Пример 1. Пусть имеется квадрат размером 3×3 клетки. В каждой строке (столбце) не должно стоять одинаковых чисел. Множество чисел, которыми заполняется квадрат, – $\{1, 2, 3\}$. Каждой клетке сопоставим некоторую переменную X_i (атрибут D -системы), которая задана на домене – $\{1, 2, 3\}$.

Изначально конкретные числа стоят только в трех клетках. Значения остальных переменных не определены (рис. 4). Несмотря на то что в примере областями определения переменных является множество чисел, сами ограничения имеют качественный характер, так как отношение линейного порядка внутри домена не учитывается. Другими словами, числовые значения переменных можно заменить символьными.

X_1	X_2	X_3
3	{1,2,3}	{1,2,3}
X_4	X_5	X_6
1	2	{1,2,3}
X_7	X_8	X_9
{1,2,3}	{1,2,3}	{1,2,3}

Рис. 4. Вариант задачи «Магический квадрат»
Fig. 4. Variant of the “Magic square” problem



Решение. Покажем, как с помощью D -системы представить ограничения, выражающие запрет на присутствие одинаковых чисел в первой строке. Остальные ограничения формализуются по аналогии. Сначала рассмотрим следующее ограничение: «в двух клетках X_i и X_j не может быть одинаковых чисел». Оно является отрицанием утверждения «в двух клетках X_i и X_j находятся одинаковые числа», которое записывается с помощью такой C -системы:

$$S[X_i X_j] = \begin{bmatrix} \{1\} & \{1\} \\ \{2\} & \{2\} \\ \{3\} & \{3\} \end{bmatrix}.$$

Тогда требуемое ограничение для двух клеток будет выражаться как D -система, являющаяся дополнением C -системы $S[X_i X_j]$ относительно $\{1,2,3\} \times \{1,2,3\}$:

$$W[X_i X_j] = \overline{S[X_i X_j]} = \begin{bmatrix} \{1\} & \{1\} \\ \{2\} & \{2\} \\ \{3\} & \{3\} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \{2,3\} & \{2,3\} \\ \{1,3\} & \{1,3\} \\ \{1,2\} & \{1,2\} \end{bmatrix}.$$

Теперь выпишем ограничение для всей первой строки магического квадрата:

$$CS[X_1 X_2 X_3] = W[X_1 X_2] \cap_G W[X_1 X_3] \cap_G W[X_2 X_3].$$

В результирующей D -системе 9 строк (кортежей).

Здесь используется операция обобщенного пересечения D -систем. Результат пересечения двух D -систем можно представить как D -систему, строки которой содержат лишь строки пересекаемых D -систем. В том случае, если пересекаемые D -системы сформированы в разных схемах, то они приводятся к общей схеме путем заполнения соответствующих позиций в кортежах (строках) фиктивными компонентами.

Факт нахождения в верхней левой клетке магического квадрата числа 3 описывается с помощью еще одного ограничения – десятой строки D -системы.

Имеем следующую задачу CSP:

$$\begin{array}{c} X_1 \quad X_2 \quad X_3 \\ \{1, 2, 3\} \quad \{1, 2, 3\} \quad \{1, 2, 3\} \\ \begin{array}{l} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \\ 8 \\ 9 \\ 10 \end{array} \left[\begin{array}{ccc} \{2, 3\} & \{2, 3\} & \emptyset \\ \{1, 3\} & \{1, 3\} & \emptyset \\ \{1, 2\} & \{1, 2\} & \emptyset \\ \{2, 3\} & \emptyset & \{2, 3\} \\ \{1, 3\} & \emptyset & \{1, 3\} \\ \{1, 2\} & \emptyset & \{1, 2\} \\ \emptyset & \{2, 3\} & \{2, 3\} \\ \emptyset & \{1, 3\} & \{1, 3\} \\ \emptyset & \{1, 2\} & \{1, 2\} \\ \{3\} & \emptyset & \emptyset \end{array} \right] . \end{array}$$



Состояние задачи CSP помимо самой матрицы D -системы характеризуется еще и списком пар «атрибут – домен атрибута», представляющим собой частичное решение.

Теперь уточним некоторые особенности процесса редуцирования пространства поиска (распространения ограничений) на основе матриц ограничений, а именно:

- как уменьшить размерность пространства поиска (упростить описание задачи CSP), не прибегая к ветвлению;
- что служит признаком успешного завершения процесса поиска (в частности, распространения ограничений);
- каков признак того, что поиск зашел в тупик (в частности, признак неуспеха при распространении ограничений).

Для того чтобы ответить на эти вопросы, рассмотрим следующие утверждения, приводимые здесь без доказательств.

Утверждение 1 (У1). Если хотя бы одна строка D -системы пуста (содержит все пустые компоненты), то D -система пуста (CSP несовместна).

Утверждение 2 (У2). Если все компоненты некоторого атрибута пусты, то данный атрибут можно удалить из D -системы (удаляются все компоненты, стоящие в соответствующем столбце), а пара «удаляемый атрибут – его домен» сохраняется в векторе частичного решения.

Утверждение 3 (У3). Если в D -системе есть строка (кортеж), содержащая лишь одну непустую компоненту, то все значения, не входящие в эту компоненту, удаляются из соответствующего домена.

Утверждение 4 (У4). Если строка D -системы содержит хотя бы одну полную компоненту, то данная строка удаляется (можно удалить соответствующее ограничение из системы ограничений).

Утверждение 5 (У5). Если компонента некоторого атрибута D -системы содержит значение, не принадлежащее соответствующему домену, то это значение удаляется из компоненты.

Утверждение 6 (У6). Если одна строка D -системы полностью доминирует (покомпонентно содержит) другую строку, то доминирующая строка удаляется из D -системы.

Ответом на первый вопрос и служит большинство из приведенных утверждений, часть из которых позволяет исключать значения из доменов атрибутов (У3, У5) или даже сами столбцы-атрибуты (У2), а часть дает возможность исключать из рассмотрения лишние строки (У4, У6).

Признак успешного завершения процесса поиска – элиминация из D -системы всех строк и столбцов без образования пустых строк. Другими словами, результирующее состояние в этом случае будет характеризоваться только совокупностью непустых усеченных доменов в векторе решения.

Ответ на третий из поставленных вопросов дает нам **У1**, то есть *признаком несовместности CSP* является пустота D -системы.

Утверждения **У1–У6** широко используются в разработанных автором алгоритмах распространения ограничений, которые приводятся ниже.

Прежде чем перейти к их изложению, сделаем несколько замечаний и введем понятия, которые потребуются в дальнейшем.

Значение в домене некоторого атрибута будем называть *лишним*, если не существует решения задачи CSP, куда бы входило данное значение переменной (атрибута D -системы).

Подматрицей D -системы будем называть D -систему, полученную из исходной путем выбора тех компонент, которые стоят на пересечении некоторых строк и столбцов исходной D -системы.

Будем говорить, что значение переменной (атрибута D -системы) в заданном



ограничении имеет *поддержку* (support), если существуют такие значения для других переменных в этом ограничении, при которых ограничение удовлетворяется.

Предлагаемые в работе алгоритмы не требуют, чтобы производилась предварительная бинаризация всех ограничений. Их основная идея состоит в том, чтобы анализировать не всю исходную D -систему, а выбирать ее подматрицы, которые соответствуют унарным и бинарным ограничениям, то есть ограничениям, где участвуют одна или две переменных. Анализ таких подматриц позволяет рассматривать меньшее число строк и столбцов, чем в исходной матрице D -системы. При этом выявление «лишних» значений в доменах атрибутов подматрицы влечет удаление этих же значений из доменов атрибутов всей исходной D -системы, что в свою очередь приводит к элиминации значений из компонент D -системы, к удалению строк/столбцов D -системы. Когда исходная D -система «настраивается» на новые домены, могут появляться новые унарные и бинарные ограничения, к которым вновь применяются алгоритмы распространения ограничений.

Достижение совместности в узлах. Алгоритмы, обеспечивающие достижение совместности в узлах, позволяют удалить из областей определения всех переменных задачи CSP значения, которые не удовлетворяют унарным ограничениям. Типичный порядок действий при реализации данного алгоритма состоит в том, чтобы просмотреть каждый элемент в области определения каждой переменной и проверить, удовлетворяет ли значение унарным ограничениям на эту переменную. Все значения, которые нарушают унарные ограничения, удаляются из соответствующих областей. После завершения алгоритма исходная задача будет сведена к задаче, которая является совместной в узлах. Пусть a – максимальный размер областей, и n – число переменных в задаче. Так как каждое значение проверяется один раз, то временная и емкостная сложности алгоритма равны $O(an)$.

Алгоритм, обеспечивающий совместность в узлах, в рассматриваемых матрицеподобных структурах может быть записан следующим образом:

Алгоритм «Достижение совместности в узлах»

Для каждого кортежа D -системы G выполнить:

Если кортеж содержит лишь одну непустую компоненту (B_i), то все значения, не входящие в эту компоненту, удаляются из соответствующего домена D_i , то есть $D_i = B_i \cap D_i$.

После этого сам кортеж элиминируется из G , D -система «настраивается» на новый усеченный домен.

Конец алгоритма.

Другими словами, для достижения совместности в узлах требуется применить сначала **У3**, а затем **У4**.

При анализе унарных ограничений (кортежей D -системы специального вида) домены соответствующих атрибутов сужаются. Особенность представления ограничений с конечными доменами в виде D -систем состоит в том, что по мере конкретизации доменов атрибутов имеется возможность легко «настраивать», согласно **У5**, ограничения (кортежи D -системы) на новые домены, исключая тем самым из пространства поиска подобласти недопустимых присваиваний. При «настройке» ограничений могут появляться новые унарные ограничения, также сужающие области определения некоторых переменных (атрибутов). Описанная процедура распространения ограничений носит итеративный характер и состоит в циклическом применении утверждений **У3**, **У4** и **У5**.

Используя задачу «Магический квадрат», проиллюстрируем технику итеративной обработки унарных ограничений. Вернемся к D -системе, состоящей из 10-ти строк. Десятая строка содержит лишь одну непустую компоненту, соответствующую атрибуту X_1 . Опираясь на утверждение **У3**, отсекаем домен атрибута X_1 до одноэлементного множества $\{3\}$. Теперь элиминируем десятую строку по **У4**. Имеем:



	X_1	X_2	X_3
	$\{3\}$	$\{1, 2, 3\}$	$\{1, 2, 3\}$
1	$\{2, 3\}$	$\{2, 3\}$	$\emptyset$
2	$\{1, 3\}$	$\{1, 3\}$	$\emptyset$
3	$\{1, 2\}$	$\{1, 2\}$	$\emptyset$
4	$\{2, 3\}$	$\emptyset$	$\{2, 3\}$
5	$\{1, 3\}$	$\emptyset$	$\{1, 3\}$
6	$\{1, 2\}$	$\emptyset$	$\{1, 2\}$
7	$\emptyset$	$\{2, 3\}$	$\{2, 3\}$
8	$\emptyset$	$\{1, 3\}$	$\{1, 3\}$
9	$\emptyset$	$\{1, 2\}$	$\{1, 2\}$

Первый столбец содержит значения, которые уже не принадлежат домену атрибута X_1 . Поэтому применяем **У5** и «настраиваем» компоненты первого столбца на новый домен, исключая значения, не принадлежащие новому домену. Тогда одни компоненты первого столбца становятся пустыми, а другие – полными. После исключения на основе **У4** из D -системы строк 1, 2, 4, 5, в первом столбце остаются только пустые компоненты. Значит, можно, воспользовавшись утверждением **У2**, исключить первый столбец из D -системы и пополнить вектор частичного решения. Имеем:

Частичное решение: $X_1 - \{3\}$.

Остаток D -системы:

	X_2	X_3
	$\{1, 2, 3\}$	$\{1, 2, 3\}$
3	$\{1, 2\}$	$\emptyset$
6	$\emptyset$	$\{1, 2\}$
7	$\{2, 3\}$	$\{2, 3\}$
8	$\{1, 3\}$	$\{1, 3\}$
9	$\{1, 2\}$	$\{1, 2\}$

В полученной D -системе строки с номерами 3 и 6 имеют по одной непустой компоненте. Значит, принимая во внимание **У3**, домены атрибутов X_2 и X_3 редуцируются до множества $\{1, 2\}$. Затем по **У4** из D -системы исключаются сами строки 3 и 6. После чего, согласно **У5**, производится настройка D -системы на новые домены. Получаем:

Частичное решение: $X_1 - \{3\}$.

Остаток D -системы:

	X_2	X_3
	$\{1, 2\}$	$\{1, 2\}$
7	$\{2\}$	$\{2\}$
8	$\{1\}$	$\{1\}$
9	$\{1, 2\}$	$\{1, 2\}$



По У4 из оставшейся D -системы элиминируется строка 9, поскольку она содержит полные компоненты. Далее распространить ограничения не представляется возможным. Действительно, применив естественные рассуждения, мы получаем тот же результат: поскольку в крайней левой клетке первой строки магического квадрата уже стоит цифра 3, то в оставшихся двух клетках могут быть только цифры 1 и 2, но какая цифра и где она стоит, однозначно сказать нельзя без анализа других ограничений магического квадрата.

Достижение совместности по дугам. В отличие от алгоритмов достижения совместности в узлах алгоритмы этого типа более сложны. В настоящее время существует ряд алгоритмов достижения совместности по дугам [5–8]. Наиболее используемым из этого множества является алгоритм AC-3 [6], который также применяется и в алгоритмах установления совместности для непрерывных областей. Здесь рассматривается только этот алгоритм, точнее, его модификация, учитывающая особенности матричного представления ограничений.

Алгоритмы достижения совместности по дугам в общем случае удаляют больше «лишних» значений из доменов переменных, чем алгоритмы, работающие с унарными ограничениями. Основное действие в алгоритме достижения совместности по дугам – это установление совместности для каждой дуги. Уточним понятие дуги.

Сформируем подматрицу исходной D -системы следующим образом: выберем все строки исходной D -системы, которые содержат непустые компоненты только в позициях, соответствующих фиксированным атрибутам X и Y . Такая подматрица моделирует некоторое бинарное отношение (ограничение). Данное бинарное отношение на графе можно изобразить двумя дугами: дугой (X, Y) и дугой (Y, X) , где X, Y – некоторые переменные (в нашей терминологии – атрибуты). По сути, дуги задают направление проверки бинарного отношения: в первом случае исключаются «лишние» значения из домена переменной X (D_X), во втором – из домена переменной Y (D_Y).

Дугу (X, Y) можно сделать совместной, удаляя из D_X все значения, для которых не существует таких значений в D_Y , чтобы удовлетворялось соответствующее бинарное ограничение. Другими словами, из D_X исключаются все значения, не имеющие поддержки в D_Y . При таком удалении из D_X заведомо не выкидывается ни одного решения исходной задачи CSP. Процедура достижения совместности для одной дуги может быть сформулирована следующим образом:

Процедура REVISE_DOMAIN(X, Y)

DELETED <- ложь;

Для каждого значения $a \in D_X$ выполнить шаги:

Вычислить $C[XY] \cap_Q Q[XY]$, где $Q[XY] = \{a\} \emptyset$ – унарное ограничение, описывающее присваивание переменной X значения a ; $C[XY]$ – рассматриваемое бинарное отношение (ограничение).

Проверить с применением алгоритма достижения совместности в узлах справедливость утверждения $C[XY] \cap_Q Q[XY] \neq \emptyset$.

Если $C[XY] \cap_Q Q[XY] = \emptyset$ (не существует значения $b \in D_Y$, соответствующего значению $a \in D_X$, которые вместе входили бы в допустимое присваивание для $C[XY]$), то усечь домен D_X : $D_X = D_X \setminus \{a\}$;

DELETED <- истина

Возврат с DELETED

Данную процедуру можно существенно ускорить, если использовать следствия из ранее введенных теорем 1, 2.

Следствие 1 (из теоремы 1). Если при проверке совместности дуги (X, Y) значение a_i атрибута X оказывается «лишним», то «лишними» также являются и все значения множества $\{a_i\} \subseteq D_X$, такие, что: $a_i \leq a_j$.

Следствие 2 (из теоремы 2). Если при проверке совместности дуги (X, Y) найдется такое значение a_i атрибута X , что оно имеет поддержку в домене атрибута Y , то и все



элементы множества $\{a_j\} \subseteq D_x$, такие, что $a_i \leq a_j$, также имеют поддержку.

Для того чтобы сделать граф ограничений совместным по дугам, как правило, недостаточно выполнить процедуру REVISE для каждой дуги однажды, требуется многократная проверка дуг. Эту проверку предлагается реализовывать по аналогии с алгоритмом AC-3.

Приведем пример, иллюстрирующий совместную работу рассмотренных алгоритмов достижения вершинной и дуговой совместностей. Содержательная интерпретация данного примера несущественна.

Пример 2. Пусть задача CSP записана в пространстве $\{c, d, e\} \times \{a, b, c, d, e\} \times \{b, d\}$ в виде D -системы:

	X_1	X_2	X_3
	$\{c, d, e\}$	$\{a, b, c, d, e\}$	$\{b, d\}$
1	$\{c\}$	$\{b, e\}$	$\{d\}$
2	$\{e\}$	$\emptyset$	$\{b\}$
3	$\{d, e\}$	$\{b, d\}$	$\emptyset$
4	$\{e\}$	$\{a, c\}$	$\emptyset$
5	$\emptyset$	$\{a, c\}$	$\{b\}$
6	$\{c, d\}$	$\{a, d\}$	$\emptyset$

Требуется найти хотя бы одно решение задачи CSP.

Решение. В данной D -системе выделим следующую подматрицу:

	X_1	X_2
	$\{c, d, e\}$	$\{a, b, c, d, e\}$
3	$\{d, e\}$	$\{b, d\}$
4	$\{e\}$	$\{a, c\}$
6	$\{c, d\}$	$\{a, d\}$

Рассмотрим дугу (X_1, X_2) . Исходя из анализа первого столбца, для значений атрибута X_1 можно задать следующее отношение частичного порядка $c \leq d$, значение e несравнимо с остальными значениями. Для атрибута X_1 сначала будем проверять значение c , опираясь на следствие 2. При выборе данного значения первые компоненты строк 3 и 4 становятся пустыми, а вторые компоненты этих строк противоречат друг другу. Следовательно, проверка показывает, что значение c является «лишним» значением в домене атрибута X_1 . Новый домен атрибута $X_1 - \{d, e\}$. После «настройки» подматрицы на новый домен атрибута X_1 получаем:

	X_1	X_2
	$\{d, e\}$	$\{a, b, c, d, e\}$
4	$\{e\}$	$\{a, c\}$
6	$\{d\}$	$\{a, d\}$



Затем проверяем значения d и e . Проверка этих значений не позволяет сузить домен атрибута X_1 .

Рассматриваем дугу (X_2, X_1) . Для атрибута X_2 частично упорядоченное множество значений домена выглядит следующим образом: $d \leq a$; $c \leq a$, остальные значения несравнимы. Проверяем сначала значения c и d . Данные значения имеют поддержку в домене атрибута X_1 , а именно, $\{d\}$ и $\{e\}$ соответственно. Значит, согласно следствию 2, значение a также будет иметь поддержку. Осталось проверить значения b и e . Оба эти значения не имеют поддержки в атрибуте X_1 , значит, их можно исключить из домена атрибута X_2 . Проверка выбранной подматрицы завершена, соответствующая подзадача CSP совместна по дугам.

После «настройки» исходной D -системы на вновь полученные домены имеем:

	X_1	X_2	X_3
	$\{d, e\}$	$\{a, c, d\}$	$\{b, d\}$
1	$\emptyset$	$\emptyset$	$\{d\}$
2	$\{e\}$	$\emptyset$	$\{b\}$
4	$\{e\}$	$\{a, c\}$	$\emptyset$
5	$\emptyset$	$\{a, c\}$	$\{b\}$
6	$\{d\}$	$\{a, d\}$	$\emptyset$

Далее запускается процедура обработки унарных ограничений. В итоге решение задачи CSP будет следующим: $X_1 - \{e\}$, $X_2 - \{a\}$, $X_3 - \{d\}$.

Все строки D -системы были вычеркнуты в результате «настройки» на вновь полученные домены, следовательно, получено допустимое решение CSP.

В разбираемом примере применение разработанных автором алгоритмов распространения ограничений позволило получить решение задачи CSP.

Однако в некоторых случаях предлагаемые методы останавливаются, достигнув неподвижной точки, при этом решение задачи CSP может быть еще не получено. Поэтому подобные методы обычно применяются совместно со стратегиями поиска с возвратами [8, 9], обеспечивающими систематическое исследование пространства поиска, и/или с методами обработки глобальных ограничений [10, 11].

Организация поиска в глубину с возвратами. Все задачи удовлетворения ограничений можно разделить на следующие категории:

- 1) задачи, в которых достаточно найти одно любое решение;
- 2) задачи, в которых требуется найти все решения;
- 3) задачи, в которых надо найти оптимальное решение, где оптимальность определяется в соответствии с некоторым критерием. В таких задачах часто бывает достаточно найти почти оптимальное решение.

Здесь кратко рассмотрим один из методов поиска в глубину с возвратами, основанный на матричном представлении ограничений и использующий описанные ранее алгоритмы распространения ограничений для нахождения одного из решений задачи CSP. Его подробное описание можно найти в [12]. При внесении незначительных изменений метод может быть адаптирован и для решения задач CSP двух других категорий. В предлагаемом методе дерево поиска представляется как *дерево частичных присваиваний* – это дерево, где каждая вершина соответствует некоторому частичному присваиванию. Корень дерева отвечает пустому присваиванию. В каждой вершине v выбирается лишь одна переменная, которой еще не было присвоено значение на предыдущих уровнях дерева поиска. Заметим, что это далеко не



единственный способ построения дерева поиска. В работе [13] описан разработанный автором метод, который строит дерево поиска, сопоставляя его уровням не переменные (атрибуты), а уравнения системы ограничений.

Среди методов поиска в глубину, используемых при решении CSP, можно выделить те методы, где переменные просматриваются в некотором заранее выбранном порядке. Однако такое статическое упорядочение переменных редко приводит к эффективному поиску. Следовательно, выбор переменной и присваиваемого ей значения должен осуществляться динамически на каждом шаге поиска. Для осуществления подобного выбора применяются различного рода *эвристики*, позволяющие отложить исследование менее перспективных ветвей дерева поиска, отдав предпочтение более перспективным с точки зрения скорейшего получения решения.

Далее опишем используемый в предлагаемом методе эвристики механизм возврата из тупиковых вершин.

Выбор наилучшего преемника на основе эвристик. Для выбора наилучшего преемника текущей вершины дерева поиска необходимо ответить на вопросы:

1. Какой переменной на данном шаге присваивать значения?
2. Какое из выбранных значений переменной быстрее всего может привести к цели?

Для ответа на данные вопросы в настоящей работе предлагаются эвристики:

Э1. Выбирать атрибут с доменом, содержащим наименьшее количество значений, что позволяет проверять меньшее количество преемников.

Э2. В случае неоднозначности выбора, производимого согласно **Э1**, выбирать атрибут, количество непустых компонент которого максимально.

Э3. Для формирования нового одноэлементного домена выбирать наиболее часто встречающееся в соответствующем столбце *D*-системы значение атрибута.

Предлагаемый метод предназначен для систематического исследования пространства поиска на основе анализа дерева частичных присваиваний, то есть гарантированно позволяет либо получить решение, либо установить, что его не существует. Систематичность достигается благодаря тому, что производится регистрация ранее исследованных альтернатив. После обнаружения тупиковой вершины осуществляется возврат к некоторой точке ветвления, расположенной выше в дереве поиска. При этом используется *механизм обратного перехода, управляемого конфликтами* (conflict-directed backjumping).

Выводы

В работе сформулированы две теоремы о свойствах *D*-систем и следствия из них, которые в совокупности с предлагаемыми правилами редукции позволяют успешно распространять нечисловые ограничения над конечными доменами: выявлять в пространстве поиска подпространства допустимых и недопустимых присваиваний, проверяя лишь часть значений в домене.

На основе следствий из упомянутых теорем разработаны модификации известных методов распространения ограничений, в частности, обеспечивающие достижение вершинной и дуговой совместностей для случая нечисловых ограничений. Данные модификации, в отличие от большинства аналогов, позволяют редуцировать задачу CSP, даже если она изначально не была представлена посредством совокупности лишь унарных и бинарных ограничений. Предлагаемые методы носят итеративный характер и позволяют некоторые экземпляры задач CSP сводить к задачам меньшей размерности без организации ветвлений.

Для случая, когда методы редукции останавливаются, не достигнув решения CSP, автором описан метод систематического поиска решений задачи удовлетворения ограничений, где, помимо упомянутых алгоритмов достижения совместностей, применяются оригинальные эвристики. Динамически управляя выбором столбцов *D*-системы (атрибутов) и значений атри-



бутов, то есть, формируя дерево поиска на основе анализа текущего состояния задачи CSP, удается свести к минимуму вероятность выполнения возвратов из тупиковых вершин дерева поиска.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты №№ 16-07-00377а, 16-07-00562а, 16-07-00273а, 18-07-00615а).

Библиографический список

1. Bartak R. Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail: Proceedings of the Week of Doctoral Students (WDS99). Prague: MatFyzPress. 1999. Vol. IV. P. 555–564.
2. Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Pearson Education. (2010).
3. Кулик Б.А., Зуенко А.А., Фридман А.Я. Алгебраический подход к интеллектуальной обработке данных и знаний. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та. 2010. 235 с.
4. Zakrevskij A. Integrated Model of Inductive-Deductive Inference Based on Finite Predicates and Implicative Regularities // In Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems. IGI Global. 2013. P. 1–12. DOI:10.4018/978-1-4666-1900-5.ch001
5. Mackworth A.K. Consistency in Networks of Relations // Artificial Intelligence. 1977. Vol. 8. No. 1. P. 99–118.
6. Mackworth A.K. The complexity of some polynomial network consistency algorithms for constraint satisfaction problems // Artificial Intelligence. 1997. Vol. 8. P. 99–118.
7. Bessiere C. Using constraint metaknowledge to reduce arc consistency computation // Artificial Intelligence. 1994. Vol. 65. P. 179–190.
8. Régin J-C. A Filtering Algorithm for constraints of difference in CSPs. Proceedings AAAI-94. Seattle. Washington. 1994. P. 362–367.
9. Ruttkay Zs. Constraint satisfaction a survey // CWI Quarterly. 1998. Vol. 11. P. 163–214.
10. Régin J-C. Generalized arc consistency for global cardinality constraint. Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence. Portland. 1996. P. 209–215.
11. Rossi F., van Beek P. & Walsh T. Constraint Programming. In F. van Harmelen, V. Lifschitz, B. Porter (Eds.). Foundations of Artificial Intelligence. Handbook of Knowledge Representation. 2008. Vol. 3. P. 181–211.
12. Зуенко А.А. Вывод на ограничениях с применением матричного представления конечных предикатов // Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. Вып. 3. С. 21–31.
13. Зуенко А.А., Очинская А.А. Эвристический метод удовлетворения ограничений на основе их матричного представления // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем: материалы IV Междунар. научн.-техн. конф. (Минск, 19–21 февраля 2015 г.). Минск: Изд-во БГУИР. 2015. С. 297–302.

References

1. Bartak R. Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail: Proceedings of the Week of Doctoral Students (WDS99). Prague: MatFyzPress. 1999, vol. IV, pp. 555–564.
2. Russel S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. 3rd ed. Pearson Education. (2010).
3. Kulik B.A. Zuenko A.A., Fridman A.Ya. *Algebraicheskiy podhod k intellektual'noi obrabotke dannykh i znaniy* [Algebraic approach to intelligent processing of data and knowledge]. Saint-Petersburg: Polytechnic University Publ., 2010, 235 p. (In Russian).
4. Zakrevskij A. Integrated Model of Inductive-Deductive Inference Based on Finite Predicates and Implicative Regularities // In Diagnostic Test Approaches to Machine Learning and Commonsense Reasoning Systems. IGI Global. 2013, pp. 1–12. DOI: 10.4018/978-1-4666-1900-5.ch001
5. Mackworth A.K. Consistency in Networks of Relations. Artificial Intelligence. 1977, vol. 8, no. 1, pp. 99–118.
6. Mackworth A.K. The complexity of some polynomial network consistency algorithms for constraint satisfaction problems. Artificial Intelligence. 1997, vol. 8, pp. 99–118.
7. Bessiere C. Using constraint metaknowledge to reduce arc consistency computation. Artificial Intelligence. 1994, vol. 65, pp. 179–190.
8. Régin J-C. A Filtering Algorithm for constraints of difference in CSPs. Proceedings AAAI-94. Seattle. Washington. 1994, pp. 362–367.
9. Ruttkay Zs. Constraint satisfaction a survey. CWI Quarterly. 1998, vol. 11, pp. 163–214.
10. Régin J-C. Generalized arc consistency for global cardinality constraint. Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence. Portland. 1996, pp. 209–215.
11. Rossi F., van Beek P. & Walsh T. Constraint Programming. In F. van Harmelen, V. Lifschitz, B. Porter (Eds.). Foundations of Artificial Intelligence. Handbook of Knowledge Representation. 2008, vol. 3, pp. 181–211.
12. Zuenko A.A. *Vyvod na ogranicheniyah s primeneniem matrichnogo predstavleniya konechnykh predikatov* [Conclusion



on constraints using the matrix representation of finite predicates] *Iskusstvennyi intellekt i prinyatie reshenii* [Scientific and Technical Information Processing]. 2014, issue 3, pp. 21–31. (In Russian).

13. Zuenko A.A., Ochinskaya A.A. *Evristsheskii metod udovletvoreniya ogranichenii na osnove ikh matrichnogo predstavleniya* [Heuristic method of constraint satisfaction based on their matrix representation]. *Materialy IV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii. "Otkrytye semanticheskie tekhnologii proektirovaniya intellektual'nykh system"* [Proceedings of IV International scientific and technical conference "Open Semantic Technologies for Intelligent Systems Design"]. Minsk: Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics Publ., 2015, pp. 297–302.

Критерии авторства

Зуенко А.А. провел исследование, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

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

Конфликт интересов

Зуенко А.А. заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

Zuenko A.A. declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



Оригинальная статья / Original article

УДК 004; 681; 658.512.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-88-95>

ОСОБЕННОСТИ САПР ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ КОМПЛЕКСА

© А.И. Столяров¹, Ю.В. Донецкая², Ю.А. Гатчин³

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Университет ИТМО),
197101, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, пр-кт Кронверкский, 49.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬЮ данной работы являлось определение и исследование особенностей системы автоматизированного проектирования (САПР), возникающих при проектировании комплекса и оказывающих существенное влияние на процесс проектирования и его результаты. **МЕТОДЫ.** Исследование комплекса как наиболее сложного вида изделия и объекта проектирования осуществлялось на принципах системного и блочно-ориентированного подходов с применением метода структурного анализа. Выделение основных частей комплекса и его связей, а также особенностей и требований к САПР проводилось методом анализа и последующего синтеза. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Исследована структура комплекса и определены требования и особенности его САПР. Комплекс рассмотрен в виде набора конструктивно-, функционально- и эксплуатационно-законченных изделий и их составных частей, которые также представляют собой сложные изделия со своими индивидуальными характеристиками, внутренней структурой и связями. Показано, что с технической и организационной точек зрения создание комплекса является сложной задачей. Проектирование комплекса выполняют разобщенные коллективы, различающиеся уровнем образования и опытом проектирования исполнителей, техническим и организационным обеспечением работ. Обоснована большая фактическая продолжительность работ по проектированию комплекса. Выполнен анализ и разработаны требования к САПР комплекса: необходимость информационного обеспечения во время всего процесса проектирования; необходимость обеспечения совместности рабочих подсистем на аппаратно-программном уровне; возможность применения различных способов проектирования и т.д. Сформулированы особенности САПР комплекса. Показано, что процесс проектирования является сложной логической задачей, и обоснована различная сложность работ на начальном и последующих этапах проектирования, что приводит к различному влиянию САПР на этих этапах. Соответственно изменяются и требования к профессиональным качествам проектировщиков и к организации процесса проектирования. Нередко возникает несоответствие между аппаратно-программной оснащенностью проектировщиков и задачами разработки нового изделия, что также способствует проектированию комплекса в неоднородной среде. **ВЫВОДЫ.** Выполненные исследования позволяют выделить основные особенности САПР комплекса и, используя их, повысить качество и эффективность его проектирования, поэтому поиск и выделение таких особенностей имеет важное значение. Результаты данной работы могут быть использованы при разработке конкретного метода проектирования комплекса.

Ключевые слова: комплекс, сложное изделие, связь, система автоматизированного проектирования, основные изделия, составные части.

Информация о статье. Дата поступления 26 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 26 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Столяров А.И., Донецкая Ю.В., Гатчин Ю.А. Особенности САПР при проектировании комплекса // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 88–95. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-88-95

¹Столяров Алексей Игоревич, аспирант, e-mail: aistol@corp.ifmo.ru

Aleksey I. Stolyarov, Postgraduate, e-mail: aistol@corp.ifmo.ru

²Донецкая Юлия Валерьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем e-mail: donetskaya_julia@mail.ru

Yulia V. Donetskaya, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Design and Security of Computer Systems, e-mail: donetskaya_julia@mail.ru

³Гатчин Юрий Арменакович, доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и безопасности компьютерных систем, e-mail: gatchin@mail.ifmo.ru

Yuriy A. Gatchin, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Design and Security of Computer Systems, e-mail: gatchin@mail.ifmo.ru



CAD FEATURES IN THE DESIGN OF A COMPLEX

A.I. Stolyarov, Yu.V. Donetskaya, Yu.A. Gatchin

St. Petersburg National research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (ITMO University),
49, Kronverksky pr., Saint-Petersburg, 197101, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of this work is to identify and study the features of the computer-aided design system (CAD) arising in the design of a complex and having a significant influence on the design process and its results. **METHODS.** The complex as the most composite type of a product and the object of design is studied on the principles of system and block-oriented approaches using the method of structural analysis. The main parts of the complex and its connections, as well as CAD features and requirements are identified using the method of analysis and subsequent synthesis. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Having studied the structure of the complex the requirements and features of its CAD were defined. The complex is considered as a set of structurally, functionally and operationally finished products, and their components, which are also complex products with their individual characteristics, internal structure and connections. It is shown that the creation of the complex is a complex technical and organizational task. The design of the complex is performed by separate teams differing in the level of education, design experience, technical and organizational support of the works. The big actual duration of works on complex design is substantiated. The analysis is performed and the requirements for the CAD system of the complex have been developed including: the need for information support during the entire design process; the need to ensure the compatibility of the working subsystems at the hardware and software levels; the possibility to apply various design methods, etc. The features of the CAD of the complex are formulated. It is shown that the design process is a complex logical task. The different complexity of works at the initial and subsequent design stages is justified. The latter leads to the different influence of CAD at these stages. Accordingly, the requirements for the professional qualities of designers and for the organization of the design process change. There is often inconformity with the hardware and software equipment of designers and the tasks of a new product development, which also contributes to the design of the complex in an inhomogeneous environment. **CONCLUSIONS.** The conducted researches allow to identify the main features of the CAD of a complex on the basis of which to improve the quality and efficiency of complex design. Therefore, the search and identification of such features is of great importance. The results of this work can be used in the development of a specific method of designing the complex.

Keywords: complex, complex product, connection, computer-aided design system (CAD), basic products, components

Information about the article. Received April 26, 2018; accepted for publication June 26, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Stolyarov A.I., Donetskaya Yu.V., Gatchin Yu.A. CAD features in the design of a complex. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 88–95. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-88-95 (In Russian).

Введение

При разработке комплекса значительное количество его составных частей (носителей информации) создает большие потоки данных: входных, рабочих и выходных. Существующие аппаратные и программные средства не позволяют работать с ними при заданной эффективности. Это вызывает проблемы [1], которые приводят, в том числе, к замедлению и сбоям в работе проектировщиков и аппаратных средств; искажению и потере информации; сложности организации согласованной работы различных коллективов исполнителей.

В связи с этим, а также с ростом сложности, количества и противоречивости требований к выполнению разработок

наблюдается снижение качества комплекса, увеличение сроков выполнения работ и, как следствие, снижение конкурентоспособности предприятия и большие экономические потери.

Иерархическая разветвленная структура комплекса и различные типы связей между его составными частями [2, 3] обуславливают его наивысшую сложность, что создает значительные проблемы при проектировании и требует наряду с другими решения задачи улучшения взаимодействия между группами разработчиков [4].

Таким образом, процесс создания сложных наукоемких изделий, к которым относится и комплекс, характеризуется це-



лым рядом особенностей, выявление, исследование и учет которых является одной из важнейших задач⁴. Решение одной из

них – исследование особенностей САПР при проектировании комплекса – представлено в настоящей статье.

Комплекс как объект проектирования

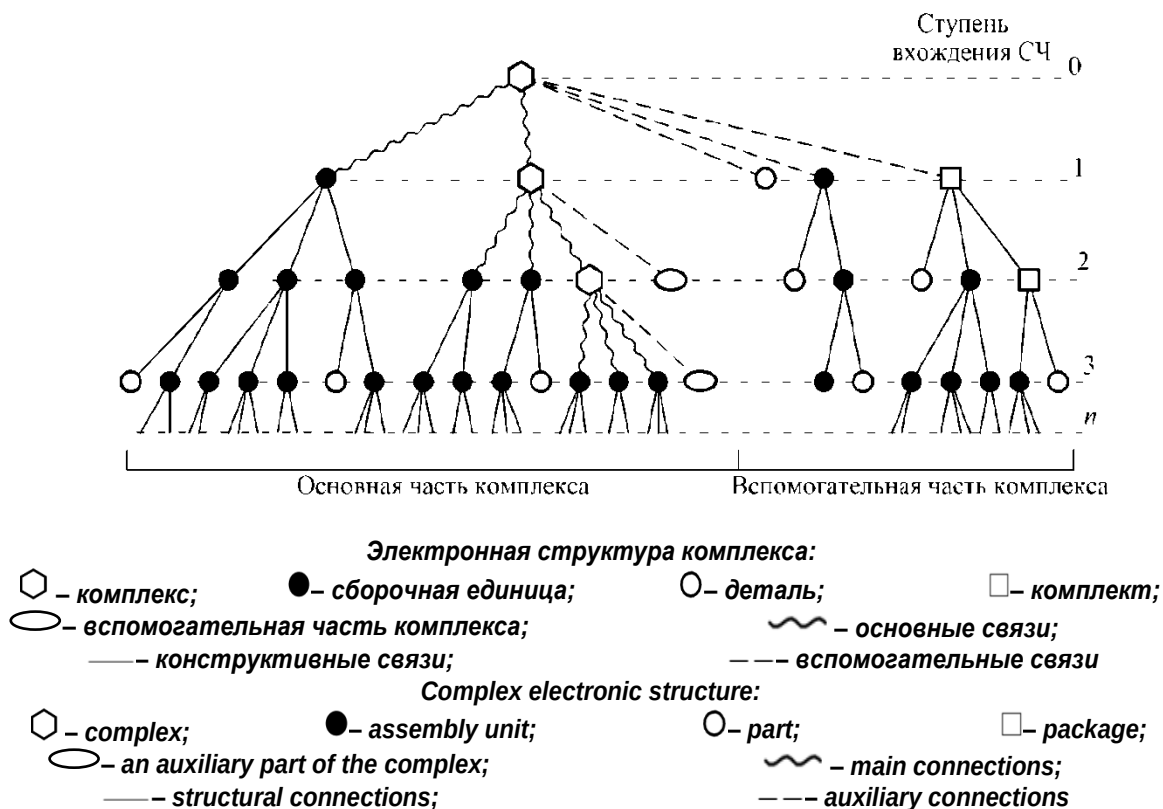
Структурные особенности комплекса. К одной из важнейших работ по созданию комплекса относится проектирование. От качества его выполнения в значительной степени зависят характеристики и свойства изделия и даже факт существования самого комплекса.

Из четырех существующих видов изделий [2, 3] комплекс единственный может включать все четыре вида (рисунок).

Ступенчатая разветвленная структура комплекса и различные функциональ-

ные связи между его составными частями обуславливают наивысшую его сложность, что создает значительные проблемы при его проектировании.

Опыт работы и анализ показали, что в некоторой нормативной литературе^{5,6} и ряде научных работ приводятся структуры комплекса, которые характеризуются неточностью, что приводит к неточностям и ошибкам в понимании и толковании сущностей структуры комплекса.



⁴Основы автоматизированного проектирования: учебник для вузов / под ред. А.П. Карпенко. М.: ИНФРА-М, 2017. 329 с. / Fundamentals of computer-aided design: textbook for universities / under edition of A.P. Karpenko. Moscow: INFRA-M Publ., 2017, 329 p.

⁵ГОСТ 2.101-68. Единая система конструкторской документации. Виды изделий. Введ. 01.01.1971 г. М.: Стандартинформ, 2007. 5 с. / GOST 2.101-68. Unified system of design documentation. Types of products. Introduced 1 January 1971. Moscow.: Standartinform Publ., 2007, 5 p.

⁶ГОСТ 2.102-2013. Единая система конструкторской документации. Виды и комплектность конструкторских документов. Введ. 01.06.2014 г. М.: Стандартинформ, 2014. 15 с. / GOST 2.102-2013. Unified system of design documentation. Types and contents of design documents. Introduced 1 June 2014. Moscow: Standartinform Publ., 2014, 15 p.



Для исключения указанных недостатков разработана структура комплекса (см. рисунок), терминология на его составные части и внутренние связи. С учетом этого выполнены структурные исследования комплекса как объекта проектирования.

Комплекс был структурно разделен на две принципиально различные части: основное изделие и вспомогательные изделия.

При проектировании основное изделие представляет собой основную сущность – комплекс, его структуру, входимость составных частей и связи. Непосредственно комплекс образовывается специфицированными функционально законченными изделиями, названными термином *основные комплексообразующие изделия*. Эти изделия, функционально независимые друг от друга, имеют функциональные связи с комплексом и обеспечивают выполнение взаимосвязанных эксплуатационных функций. Каждое основное комплексообразующее изделие является в свою очередь структурно сложным изделием с присущими для него характеристиками, структурой и связями. Предназначено оно для осуществления одной или более основных функций, заданных всему комплексу как изделию в целом.

Эти изделия подбираются или разрабатываются на основании заданных конкретных эксплуатационных характеристик (функций) и свойств всего комплекса как изделия.

Комплекс как конечное изделие имеет нулевую ступень вхождения. В него (в его основную часть) могут входить, т.е. непосредственно образовывать комплекс как изделие, только сборочные единицы и комплексы нижней (первой) ступени вхождения. При этом комплексы могут входить только в комплексы вышестоящей ступени вхождения. Следовательно, основными комплексообразующими изделиями могут быть только сборочные единицы и комплексы. Количество изделий любого вида и уровня вхождения может быть любое и различное. Сам комплекс как изделие нулевого уровня вхождения всегда один.

Таким образом, выполненное исследование показывает, что, исходя из структуры, количества и типов связей, комплекс структурно и функционально относится к самому сложному виду изделия. Это обусловлено совокупной сложностью и противоречивостью задач, которые должны решаться комплексом при эксплуатации и решение которых невозможно обеспечить сборочной единицей любой сложности.

Особенности комплекса как объекта проектирования. Комплекс содержит большое количество составных частей, относящихся к составным частям, непосредственно его образующим (основные комплексообразующие изделия), и вспомогательным (см. рисунок).

Основные комплексообразующие изделия – сборочные единицы и комплексы первой ступени вхождения, отличаются между собой конструкцией, функциональностью и характеристиками.

Перечисленные изделия, в отдельности или совокупности, обеспечивают выполнение различных требований заказчика. Комплексообразующие изделия первой ступени могут подбираться или создаваться. Эти изделия содержат составные части, не имеющие самостоятельного эксплуатационного назначения.

К вспомогательным частям комплекса в общем случае можно отнести детали, сборочные единицы и комплекты, которые используются при монтаже и обслуживании основной части (комплекса) на месте и во время его эксплуатации. Следует отметить, что вспомогательная часть комплекса в виде самостоятельного (отдельного) элемента поставки с комплексом может отсутствовать в случаях, если ее элементы интегрированы в «свое» комплексообразующее изделие или поставляются на место эксплуатации по документации своего комплексообразующего изделия.

Следовательно, комплекс содержит несколько различно взаимодействующих и не взаимодействующих групп изделий, которые имеют свои функциональные цели и решают частные задачи, что позволяет сформулировать особенности организации



взаимодействия групп разработчиков.

При организации работ по разработке комплекса следует учитывать, что разработку всего комплекса, особенно его составных частей, осуществляют различные коллективы проектировщиков, которые до совместной работы были производственно разобщены, имели слабые связи между собой и которые различаются образованием, квалификацией, опытом работы, производственными традициями, умением применять соответствующие инструментальные средства.

Следовательно, разрабатывая комплекс, проектировщик должен решать значительный объем научных и технических проблем, выполнять поисковые исследования, проводить работы по оптимизации принимаемых решений, обеспечивать согласованную работу всех участников процесса проектирования. Все это в совокупности увеличивает время проектирования.

Необходимо подчеркнуть, что на эффективность проектирования оказывает значительное влияние как объем проектных работ, так и соответствие между задачами, решаемыми разработчиками комплекса, и инструментальным обеспечением САПР⁷. При этом имеющая важное значение организация работ должна характеризоваться разнообразием и достаточностью: проводиться качественно и в необходимом объеме в соответствии с задачами, решаемыми САПР; обеспечивать возможность

перестройки под изменяющиеся условия работы коллективов проектировщиков.

Длительность процесса проектирования в значительной степени связана с кадровым составом проектировщиков (разработчиков): их профессионализмом, опытом работы, уровнем образования, способностью к обучению и самообучению и другими качествами.

С учетом [5–8] можно отметить:

1. Комплекс содержит большое количество различных изделий, которые необходимо проектировать и согласовывать между собой, что создает большие потоки информации.

2. Изделия комплекса могут разрабатываться различными коллективами, которые характеризуются:

- значительной территориальной разобщенностью;
- различной технической и научной (материальной и кадровой) оснащенностью;
- различным уровнем знаний, опытом работы и квалификацией работников;
- различным количеством работников;
- слабой связью между разработчиками или ее полным отсутствием.

Даже этот краткий анализ показывает, что создание комплекса является сложной технической и организационной задачей, и необходимо решать ряд сложных проблем.

Требования к САПР комплекса

Комплекс, являясь самым сложным видом промышленного изделия, предопределяет значительные проблемы при его создании. С учетом этого можно сформулировать некоторые специальные требования к его САПР:

1) обеспечение разработчиков всей необходимой информацией о комплексе на

протяжении всего процесса его проектирования;

2) обеспечение совместимости на аппаратном, программном и информационном уровнях разрабатываемых или заимствованных подсистем;

3) возможность применения метода параллельного проектирования с исполь-

⁷ГОСТ 23501.101-87. Системы автоматизированного проектирования. Основные положения; утв. и введен в действие постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 26.06.1987 г. № 2668; введен с 01.07.1988 г. М.: Издательство стандартов, 1987. 11 с. / GOST 23501.101-87. Computer aided design systems. Basic provisions; approved and put into effect by the Order of the State Committee of the USSR on standards of 26 June 1987, No. 2668; introduced 1 July 1988. Moscow: Standards Publ., 1987. 11 p.



зованием автоматического регулирования ресурсов вычислительных системы в зависимости от весомости задания;

4) возможность кооперативного проектирования;

5) возможность применения различных способов проектирования;

6) возможность проведения оптимизации проектных решений;

7) обеспечение возможности проектирования составных частей комплекса при его модернизации;

8) обеспечение заданной надежности, качества, быстродействие при проектировании;

9) минимально возможные требования к необходимости повышения машинных ресурсов;

10) максимальная возможность перестройки существующей САПР под разработку нового комплекса;

11) возможность адаптации к отечественной нормативно-технической документации и ЕСКД;

12) обеспечение модульного принципа формирования САПР.

Следует отметить, что для САПР комплекса эти требования являются основными базовыми, а также определяют особенности этой САПР.

Особенности САПР комплекса

Как показывает практика, на начальных этапах проектирования зачастую приходится интуитивно, с использованием логических связей и умозаключений находить оптимальные решения поставленных задач. Причем эти связи могут быть достаточно многозвенными и сложными, что требует от проектировщика глубокого и широко направленного логического мышления. Это достигается опытом работы, грамотностью, умением абстрактно мыслить и другими способами, в том числе методами логического проектирования.

Оптимизация решений при создании комплекса должна базироваться на широком спектре поиска и вариантности решений. При этом применяются различные методы: моделирование, структурный анализ, комбинаторика, подбор аналогов из всей номенклатуры ранее выпущенных комплексов. Ввиду специфики такую работу выполняет узкий круг специалистов. В результате значительно увеличивается объем входных данных. Возникшее в результате этого большое их разнообразие и количество, значительная разветвленность маршрутов движения при обработке, а также отсутствие решений способствует тому, что в начале сложность проектирования значительнее, чем при дальнейшем проектировании.

Такое положение имеет большое значение и для создания комплекса. В этот

период разработчики начинают «понимать» комплекс, его функциональные и конструктивные особенности и другие важнейшие вопросы. Как правило, нечеткость и неполнота системных требований, а также некачественное начальное проектирование приводят к значительным проблемам в дальнейшем, которые могут быть не только неразрешимыми, но и привести к невыполнению всего задания.

В результате этого на начальных этапах работ (на этапах поиска, исследований, работы с «облаками» и идеями, т.е. на этапах творчества, когда отсутствуют типовые формализованные решения) роль САПР фактически сужается и является весьма незначительной. В дальнейшем роль САПР должна становиться преобладающей.

В создании комплекса, в том числе и его составных частей, принимает участие значительное число различных исполнителей, при этом предприятий может быть одно или несколько. Обычно эти предприятия выпускают продукцию известного для него типа, а выпуск другого типа комплекса вызывает необходимость разработки и освоения нового для предприятия изделия, что происходит как на базе его специализации, так и вне этого. То есть возникает необходимость решать новые многогранные задачи.

Следует отметить, что как аппарат-



ная, так и программная оснащенность исполнителей работ может не в полной мере соответствовать задачам по созданию комплекса, в том числе и его составных частей. Указанное выше несоответствие может в разной степени относиться к различным группам исполнителей работ, что препятствует принятию общего решения, устраняющего данное несоответствие.

Таким образом, проектирование комплекса выполняется в среде, обладающей неоднородностью, на нескольких аппаратных платформах и программных средствах, что также является одной из особенностей САПР. Следовательно, при разработке САПР комплекса и организации работ по проектированию необходимо учи-

тывать эти особенности.

В настоящее время продолжается непрерывный поиск решений по улучшению процесса проектирования сложных изделий. Например, в работе [9] предлагается при нисходящем моделировании механических изделий объединить CAD и CAE, то есть создать новый механизм моделирования, названный CADWE (Computer-Aided Design-While-Engineering). В работе [10] рассматривается метод оптимизации, базирующийся на иерархической параллельной обработке проблем. Концептуальные идеи этого метода могут быть учтены при разработке метода проектирования комплекса.

Заключение

Исследования показали, что комплекс является наиболее сложным видом промышленного изделия. Структурно он содержит огромное количество различных составных частей, которые в общем случае необходимо проектировать. Составные части могут отличаться многочисленными признаками: характеристиками, конструкцией, функциональностью, связями. Все это значительно увеличивает объем проектных работ, что необходимо учитывать при организации процесса проектирования комплекса.

Изучение вопросов взаимодействия различных коллективов и кадров разработчиков выявили особенности их совместной работы и ее организации при проектировании комплекса, а также влияние этих особенностей на процесс проектирования, что целесообразно учитывать при организации процесса проектирования комплекса.

САПР является одним из действенных и эффективных средств автоматизации процесса проектирования изделий, что для такого чрезвычайно сложного изделия, как комплекс, имеет особое значение. Поэтому авторами настоящей статьи были исследо-

ваны и разработаны базовые требования к САПР комплекса.

Проектирование комплекса характеризуется целым рядом особенностей, что отражается в его САПР. Некоторые из этих особенностей в ряде случаев могут оказать существенное влияние на качество и результаты процесса проектирования, поэтому поиск и выделение таких особенностей имеет большое значение. Такой подход был применен в выполненном исследовании особенностей САПР и приведен в настоящей статье.

Дальнейшие исследования особенностей САПР целесообразно проводить в направлении разработки конкретного метода проектирования комплекса.

Результаты данного исследования могут быть использованы при разработке конкретного метода проектирования комплекса.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 17-07-00700 "а" – «Методы формальной и функциональной верификации вычислительных процессов, основанные на знаниях и графо-аналитических моделях»).

Библиографический список

1. Васильева Е. Круглый стол: СХД в эпоху Больших Данных // Рациональное управление предприятием. 2015. № 1. С. 8–16.

2. Столяров А.И., Гатчин Ю.А. Анализ структуры сложных изделий приборостроения // Альманах научных работ молодых ученых Университета



ИТМО: сб. тр. XLV науч. и учеб.-метод. конф. Университета ИТМО (Санкт-Петербург, 02–06 февраля 2016 г.). В 5 т. СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2016. Т. 5. С. 45–48.

3. Столяров А.И., Донецкая Ю.В., Гатчин Ю.А. Особенности формирования электронной структуры комплекса в приборостроении // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2017. Т. 17. № 2 (108). С. 312–317.

4. Вигерс К., Битти Дж. Разработка требований к программному обеспечению. 3-е изд., доп.; пер. с англ. М.: Русская редакция, 2014. 736 с.

5. Столяров А.И. Особенности системы автоматизированного проектирования сложных изделий (комплексов) // Сборник трудов VI Всероссийского конгресса молодых ученых (Санкт-Петербург, 18–21 апреля 2017 г.). СПб.: Изд-во Ун-та ИТМО, 2017. С. 207–211.

6. «Белый лебедь» в «цифре». «Виртуальное КБ» создаст модернизированный стратегический раке-

тоносец // Рациональное управление предприятием. 2016. № 4-5. С. 40–43.

7. Многофункциональный переговорный комплекс компании СИБУР на базе технологий Polycom // Рациональное управление предприятием. 2017. № 1. С. 76–77.

8. Конев М.В. Интеграция различных CAD-систем в едином информационном пространстве на базе Teamcenter // Рациональное управление предприятием. 2017. № 1. С. 52–55.

9. Z. Pan et al. Computer aided design-while-engineering technology in top-down modeling of mechanical product // Computers in Industry. 2015. Vol. 75. P. 151–161.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2015.05.004>

10. Basani Satish et al., Hierarchical parallel processing for design optimization – a case study // Materials Today Proceedings. 2018. Vol. 5. P. 5117–5123.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.092>

References

1. Vasil'eva E. Round table: Storage area network in the era of Big Data. *Racional'noe upravlenie predpriyatiem* [Rational Enterprise Management]. 2015, no. 1, pp. 8–16. (In Russian).

2. Stolyarov A.I., Gatchin Yu.A. *Analiz struktury slozhnykh izdelii priborostroeniya* [Analysis of the structure of complex products of instrument-making industry]. *Sbornik trudov XLV nauchnoi i uchebno-metodicheskoi konferentsii Universiteta ITMO "Al'manakh nauchnykh rabot molodykh uchenykh Universiteta ITMO"* [Proceedings of XLV scientific and academic-methodological conference "Almanac of scientific works of young scientists of ITMO University"]. Saint-Petersburg: ITMO University Publ., 2016, vol. 5, pp. 45–48. (In Russian).

3. Stolyarov A.I., Doneckaya Yu.V., Gatchin Yu.A. Formation features of the complex electronic structure in instrument engineering. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2017, vol. 17, no. 2 (108), pp. 312–317. (In Russian).

4. Vigers K., Bitti Dzh. *Razrabotka trebovanij k programnomu obespecheniyu* [Development of software requirements]. Moscow: Russian edition Publ., 2014, 736 p. (In Russian).

5. Stolyarov A.I. *Osobennosti sistemy avtomatizirovannogo proektirovaniya slozhnykh izdelii (kompleksov)* [Features of the complex product computer-aided de-

sign system]. *Sbornik trudov VI Vserossiiskogo kongressa molodykh uchenykh* [Collection of articles of VI All-Russian Congress of young scientists]. Saint-Petersburg: ITMO University Publ., 2017, pp. 207–211. (In Russian).

6. "Belyi Lebed" in the digital form. Virtual design bureau will create a modernized strategic missile carrier. *Racional'noe upravlenie predpriyatiem* [Rational Enterprise Management]. 2016. No. 4-5, pp. 40–43. (In Russian).

7. Multifunctional conference complex of the SIBUR company based on Polycom technologies. *Racional'noe upravlenie predpriyatiem* [Rational Enterprise Management]. 2017, no. 1, pp. 76–77. (In Russian).

8. Konev M.V. Integration of various CAD-systems in a single information space on the basis of Teamcenter. *Ratsional'noe upravlenie predpriyatiem* [Rational Enterprise Management]. 2017, no. 1, pp. 52–55. (In Russian).

9. Z. Pan et al. Computer aided design-while-engineering technology in top-down modeling of mechanical product. *Computers in Industry*. 2015, vol. 75, pp. 151–161.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2015.05.004>

10. Basani Satish et al., Hierarchical parallel processing for design optimization – a case study. *Materials Today Proceedings*. 2018, vol. 5, pp. 5117–5123.

<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.092>

Критерии авторства

Столяров А.И., Донецкая Ю.В., Гатчин Ю.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

Stolyarov A.I., Donetskaya Yu.V., Gatchin Yu. 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 001.38

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-96-101>

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ИНТЕГРАЛЬНОГО ИНДЕКСА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ПРОФЕССОРСКО-ПРЕПОДАВАТЕЛЬСКОГО СОСТАВА И НАУЧНЫХ СОТРУДНИКОВ ВУЗА

© Ю.А. Черных¹, Д.С. Витвицкий², О.И. Кузьмина³

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Разработать алгоритм расчета интегрального индекса эффективности публикационной активности (ИИЭПА) профессорско-преподавательского состава (ППС) и научных сотрудников высшего учебного заведения. **МЕТОДЫ.** Рейтинг ППС и научных сотрудников необходим для поддержания соответствующего статуса вуза. Для этого обязательным условием является ведение научно-исследовательской работы, особенно публикационная активность авторов, в которую входит выпуск монографий, статей в различных журналах с импакт-фактором высокого уровня, а также регистрация патентов, получение авторских свидетельств. В статье перечислены основные показатели публикационной активности из научной электронной библиотеки elibrary, баз данных Scopus и Web of Science – общее число статей и общее число ссылок, индекс Хирша, показатель значимости публикаций и др. В работе предлагается усовершенствовать систему оценки эффективности публикационной активности ППС и научных сотрудников путем разработки алгоритма расчета интегрального индекса, который основан на показателях из научной библиотеки elibrary с добавлением дополнительных критериев – количества монографий, результатов интеллектуальной собственности, а также информации из баз данных Scopus и Web of Science. Для удобства расчета интегрального индекса показатели разделены на группы: *КП* – количество публикаций, *КЦ* – количество цитирований, *ИХ* – индекс Хирша, *ИС* – интеллектуальная собственность. **ВЫВОДЫ.** Описаны основные преимущества разработанного алгоритма расчета интегрального индекса эффективности публикационной активности ППС и научных сотрудников вуза. Отмечена его рациональность и эффективность в случае проведения сравнительной оценки публикационной активности не только отдельных сотрудников, но и подразделений вуза, а также всего университета в целом. Предполагается дальнейшее использование сформированного алгоритма в качестве фундамента для разработки программы расчета рейтинга сотрудников вуза по оценке их публикационной активности.

Ключевые слова: интегральный индекс, публикации, авторы, цитирование, индекс Хирша.

Информация о статье. Дата поступления 30 мая 2018 г.; дата принятия к печати 01 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Черных Ю.А., Витвицкий Д.С., Кузьмина О.И. Алгоритм расчета интегрального индекса эффективности публикационной активности профессорско-преподавательского состава и научных сотрудников вуза // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 96–101. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-96-101

ALGORITHM TO CALCULATE INTEGRATED EFFICIENCY INDEX OF UNIVERSITY ACADEMIC STAFF AND RESEARCHER PUBLICATION ACTIVITY

Yu.A. Chernykh, D.S. Vitvitsky, O.I. Kuzmina

¹Черных Юлия Александровна, магистрант Института высоких технологий, e-mail: cherymail892@gmail.com
Yulia A. Chernykh, Master's degree student of the Institute of High Technologies, e-mail: cherymail892@gmail.com

²Витвицкий Дмитрий Сергеевич, студент, e-mail: dev@floppe.ru
Dmitry S. Vitvitsky, Student, e-mail: dev@floppe.ru

³Кузьмина Ольга Ивановна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры физической культуры, e-mail: www.ariana.ru@mail.ru
Olga I. Kuzmina, Candidate of Pedagogics, Associate Professor of the Department of Physical Education, e-mail: www.ariana.ru@mail.ru



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

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is creation of an algorithm for calculating an integrated efficiency index of university academic staff and researcher publication activity. **METHODS.** The rating of academic staff and researchers is necessary for maintaining the appropriate university status. Its obligatory condition is research work, particularly publication activity which includes publication of articles and monographs in the journals with a high impact factor as well as registration of a patent and acquisition of a copyright certificate. The article lists all basic indices of publication activity including the total number of articles and references, Hirsch index, impact-factor, etc., which are taken from the scientific electronic library (elibrary), data bases Scopus and Web of Science. It is proposed to improve the rating system of academic staff and researcher publication activity efficiency by developing an algorithm to calculate an integrated index which is based on elibrary indices with addition of some criteria – number of monographs, intellectual deliverables, Scopus and Web of Science criteria. The aspects are divided into groups for convenient calculation of the integrated index: number of publications, number of citations, Hirsch index, intellectual deliverables. **CONCLUSIONS.** The main advantages of the developed algorithm for the calculation of the integrated efficiency index of university academic staff and researcher publication activity are described. The article stresses its efficiency and reasonability for the comparative analysis of publication activity of individual employees as well as departments and university as a whole. It is proposed to use the created algorithm as a basis for the development of a program to calculate the rating of university academic staff and researchers according to their publication activity.

Keywords: *integrated index, publications, authors, citation, Hirsch index*

Information about the article. Received May 30, 2018; accepted for publication June 01, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Chernykh Y.A., Vitvitsky D.S., Kuzmina O.I. Algorithm to calculate integrated efficiency index of university academic staff and researcher publication activity. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 96–101. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-96-101 (In Russian).

Введение

В настоящее время научная деятельность распространена очень широко. В каждом вузе стараются опубликовать больше статей, оформить патенты на изобретения, провести конференции, мероприятия, посвященные Дню науки и т.п. Для каждого вуза важно место в рейтинге среди других учебных заведений. Поэтому для поддержания соответствующего статуса в высших учебных заведениях обязательным условием является научно-исследовательская деятельность, особенно публикационная активность (ПА). Данный показатель является одним из самых значимых в области научной деятельности сотрудников и профессорско-преподавательского состава университета.

Специалистов по оценке рейтинга очень много. Они рассматривают оценку ПА сотрудников вузов с разных сторон, например, в источниках [1, 2] – с математической точки зрения.

Очевидно, что анализировать ПА работника только по одному показателю

недопустимо, так как результаты рейтинга по публикациям могут быть недостоверны [1]. Поэтому для оценки ПА стараются брать больше показателей. Однако, основываясь на анализе источников [1–3], можно заключить, что исследователи учитывают недостаточное количество наукометрических показателей (не более пяти), которые к тому же не всегда достаточно информативны.

Исходя из описанной проблемы, в настоящей работе предлагается, как и в сообщении авторов [4], расширить перечень данных показателей, используя их характеристики из научной электронной библиотеки elibrary, баз данных Scopus и Web of Science с добавлением дополнительных, не менее важных показателей – количества монографий, патентов, авторских свидетельств и ноу-хау.

Цель данного исследования – разработать алгоритм расчета интегрального индекса эффективности публикационной активности (ИИЭПА) ППС и научных со-



трудников вуза.

Задачи:

1. Проанализировать наукометрические показатели ПА из электронной биб-

лиотеки elibrary, а также из баз данных Scopus и Web of Science.

2. Сформировать алгоритм расчета ИИЭПА.

Методы и организация исследования

Для дальнейшего исследования были выбраны библиометрические показатели из анализа публикационной активности случайного автора из электронной библиотеки elibrary (elibrary.ru). Необходимо описать следующие их характеристики:

1) общее число статей и общее число ссылок (количество цитирований). Если отождествить качество работы научного сотрудника с числом цитирований его публикаций, то общее число ссылок является достаточно статистически надежным критерием оценки, который позволяет выявить авторов, имеющих работы высокого качества. Общее число статей может служить характеристикой научной продуктивности сотрудника [1];

2) индекс Хирша (h-индекс). При расчете данного индекса учитываются два параметра, характеризующие ПА авторов – общее количество публикаций и их востребованность в научном сообществе, т.е. цитируемость [4];

3) показатель значимости научных материалов учитывает импакт-фактор журналов, в которых они опубликованы [1].

Для анализа ПА автора в электронной библиотеке elibrary используются следующие показатели, которые также применены в предлагаемом алгоритме расчета ИИЭПА. Для более объективной оценки эффективности ПА как отдельных авторов, так и структурных подразделений вуза и всего университета в целом в список добавлен такой важный показатель, как количество монографий, патентов, авторских свидетельств и ноу-хау. Для удобства расчета значим индекс соавторства, который рассчитывается путем деления числа цитирований соавторами на число соавторов.

Количество публикаций (КП):

КП1 – показатели КП из elibrary:

КП1.1 Число публикаций на

elibrary.ru.

КП1.2 Число публикаций в РИНЦ.

КП1.3 Число публикаций, входящих в ядро РИНЦ.

КП1.4 Число статей в зарубежных журналах.

КП1.5 Число статей в российских журналах.

КП1.6 Число статей в российских журналах из перечня ВАК.

КП1.7 Число статей в российских переводных журналах.

КП1.8 Число статей в журналах с ненулевым импакт-фактором.

КП1.9 Средневзвешенный импакт-фактор журналов, в которых были опубликованы статьи.

КП1.10 Число публикаций за последние пять лет.

КП2 – количество монографий.

КП3 – показатели из баз данных Scopus и Web of Science:

КП3.1 Количество публикаций автора из базы данных Scopus.

КП3.2 Количество публикаций автора из базы данных Web of Science.

Количество цитирований (КЦ):

КЦ1 – Показатели КЦ из elibrary:

КЦ1.1 Число цитирований из публикаций на elibrary.ru.

КЦ1.2 Число цитирований из публикаций, входящих в РИНЦ.

КЦ1.3 Число цитирований из публикаций, входящих в ядро РИНЦ.

КЦ1.4 Число публикаций, процитировавших работы автора.

КЦ1.5 Число ссылок на самую цитируемую публикацию.

КЦ1.6 Число публикаций автора, процитированных хотя бы один раз.

КЦ1.7 Среднее число цитирований в расчете на одну публикацию.

КЦ1.8 Число самоцитирований.



КЦ1.9 Индекс соавторства (отношение числа цитирований соавторами к числу соавторов).

КЦ1.10 Число цитирований из зарубежных журналов.

КЦ1.11 Число цитирований из российских журналов.

КЦ1.12 Число цитирований из российских журналов из перечня ВАК.

КЦ1.13 Число цитирований из российских переводных журналов.

КЦ1.14 Число цитирований из журналов с ненулевым импакт-фактором.

КЦ1.15 Средневзвешенный импакт-фактор журналов, в которых были процитированы статьи.

КЦ1.16 Число цитирований работ автора, опубликованных за последние пять лет.

КЦ1.17 Число цитирований публикаций автора из всех публикаций за последние пять лет.

КЦ2 – показатели из баз данных Scopus и Web of Science:

КЦ2.1 Количество цитирований авторами из базы данных Scopus.

КЦ2.2 Количество цитирований авторами из базы данных Web of Science.

Индекс Хирша (ИХ):

ИХ1 – показатели ИХ из elibrary:

ИХ1.1 Индекс Хирша по всем публикациям на elibrary.ru.

ИХ1.2 Индекс Хирша по публикациям в РИНЦ.

ИХ1.3 Индекс Хирша по ядру РИНЦ.

ИХ1.4 Индекс Хирша без учета самоцитирований.

ИХ1.5 Индекс Хирша с учетом только статей в журналах.

ИХ2 – показатели из баз данных Scopus и Web of Science:

ИХ2.1 Индекс Хирша автора из базы данных Scopus.

ИХ2.2 Индекс Хирша автора из базы данных Web of Science.

Интеллектуальная собственность (ИС):

ИС1 – Количество патентов.

ИС2 – Количество авторских свидетельств.

ИС3 – Количество ноу-хау.

Ниже приведен алгоритм расчета ИИЭПА, в котором используются показатели из библиотеки elibrary, а также из двух баз данных – Scopus и Web of Science.

ИИЭПА рассчитывается путем деления суммы КП+КЦ+ИХ+ИС (количество публикаций, количество цитирований, индекс Хирша, интеллектуальная собственность) на четыре:

$$ИИЭПА = \frac{КП + КЦ + ИХ + ИС}{4}.$$

КП рассчитывается путем деления суммы КП1, КП2 и КП3 на 3:

$$КП = \frac{КП1 + КП2 + КП3}{3},$$

где КП1 рассчитывается путем деления суммы пунктов КП1.1–КП1.10 на их количество, КП2 – количество монографий. КП3 рассчитывается путем деления суммы КП3.1 и КП3.2 на 2:

$$КП3 = \frac{КП3.1 + КП3.2}{2},$$

где КП3.1 и КП3.2 – количество публикаций автора из баз Scopus и Web of Science соответственно.

КЦ рассчитывается путем деления суммы КЦ1 и КЦ2 на 2:

$$КЦ = \frac{КЦ1 + КЦ2}{2},$$

где КЦ1 рассчитывается путем деления суммы пунктов КЦ1.1–КЦ1.17 на их количество.

КЦ2 рассчитывается путем деления суммы КЦ2.1 и КЦ2.2 на 2:

$$КЦ2 = \frac{КЦ2.1 + КЦ2.2}{2},$$

где КЦ2.1 и КЦ2.2 – количество цитирований авторами из баз Scopus и Web of Science соответственно.



ИХ рассчитывается путем деления суммы ИХ1 и ИХ2 на 2:

$$ИХ = \frac{ИХ1 + ИХ2}{2},$$

где ИХ1 рассчитывается путем деления суммы пунктов ИХ1.1-ИХ1.5 на их количество, а ИХ2 – деления суммы ИХ2.1 и ИХ2.2 на 2:

$$ИХ2 = \frac{ИХ2.1 + ИХ2.2}{2},$$

где ИХ2.1 и ИХ2.2 – индекс Хирша автора

из баз Scopus и Web of Science соответственно.

ИС рассчитывается путем деления суммы ИС1, ИС2 и ИС3 на 3:

$$ИС = \frac{ИС1 + ИС2 + ИС3}{3},$$

где ИС1, ИС2, ИС3 – количество патентов, авторских свидетельств, ноу-хау соответственно.

Выводы

В результате применения выше описанного алгоритма можно рассчитать индекс публикационной активности каждого автора. Преимущество данного индекса состоит в том, что при его расчете охватывается большая часть показателей публикационной активности ППС и научных сотрудников. Его характеристики позволяют качественно оценить работу и личный научный вклад в исследования отдельного сотрудника. Исходя из этого разработанный алгоритм расчета индекса будет заложен в основу будущей программы, которая позволит выявить более объективную оценку эффективности ПА и предоставит возможность выводить рейтинг, сравнительную характеристику работы институ-

тов, кафедр, лабораторий и каждого сотрудника университета. При разработке программы, при оценке работы преподавателя будут использоваться абсолютные значения всех характеристик показателей КП, КЦ и ИХ. В то же время при оценке эффективности работы кафедр университета, лабораторий, институтов и вуза в целом будут использоваться не абсолютные оценки, а их рейтинговое место, которое они занимают в анализируемом коллективе. Данная программа будет полезна университету, ее применение обеспечит разработку и принятие оптимальных управленческих решений по совершенствованию публикационной деятельности ППС и научных сотрудников.

Библиографический список

1. Управление большими системами: сборник трудов. Специальный выпуск. Наукометрия и экспертиза в управлении наукой / под ред. Д.А. Новикова, А.И. Орлова, П.Ю. Чеботарева. М.: Изд-во ИПУ РАН, 2013. 568 с.
2. Левин В.И. Математические методы оценки вклада ученого в науку // Системы управления, связи и безопасности. 2017. № 1. С. 160–174.
3. Никитушкин В.Г. Германов Г.Н., Корольков А.Н. Рейтинг институтов МГПУ по данным публикацион-

- ной активности сотрудников // Ученые записки университета им. П.Ф. Лесгафта. 2015. № 6 (124). С. 148–155.
4. Абалян А.Г., Германов Г.Н., Фомиченко Т.Г. Сравнительная оценка публикационной активности образовательных организаций высшего образования Российской Федерации в области физической культуры и спорта // Вестник спортивной науки. 2017. № 5. С. 53–59.



References

1. *Upravlenie bol'shimi sistemami: sbornik trudov. Special'nyy vypusk. Naukometriya i ekspertiza v upravlenii naukoi / pod red. D.A. Novikova, A.I. Orlova, P.Yu. Chebotareva* [Control of large systems: Collection of scientific works. Special issue. Scientometrics and expertise in Science management/ under edition of D.A. Novikov, A.I. Orlov, P.Yu. Chebotarev]. Moscow: IPU RAN Publ., 2013, 568 p. (In Russian).
2. Levin V.I. Mathematical theory of estimation of contribution of scientist to Science. *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti* [Systems of Control, Communication and Security]. 2017, no. 1, pp. 160–174.

(In Russian).

3. Nikitushkin V.G Germanov G.N., Korol'kov A.N. Rating of MGPU institutes by results of printing activities of the employees. *Uchenye zapiski universiteta im. P.F. Lesgafta* [Proceedings of P.F. Lesgaft university]. 2015, no. 6 (124), pp. 148–155. (In Russian).
4. Abalyan A.G., Germanov G.N., Fomichenko T.G. Comparative assessment of higher school publication activity in the field of physical education and sport in the Russian Federation. *Vestnik sportivnoi nauki* [Sports Science Bulletin]. 2017, no. 5, pp. 53–59. (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 330.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-102-113>

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ ТОПЛИВОСНАБЖЕНИЯ ОТДАЛЕННЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ БИОМАССОЙ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПЛАНТАЦИЙ

© Е.В. Губий¹

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130,

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЮ работы являлось создание математических моделей, разработанных для исследования механизмов повышения надежности топливоснабжения отдаленных пунктов биомассой с энергетических плантаций. **МЕТОДЫ.** Для решения поставленных задач использовалось моделирование методом Монте-Карло, а для подготовки исходных данных – методы математической статистики. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ.** Разработаны математические модели для анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов с энергетических плантаций с учетом действия случайных факторов в производстве, потреблении и переходящих запасов топлива. Представлен численный метод формирования случайной величины запасов топлива многолетнего регулирования. Показано, что он вырабатывает марковскую последовательность. Оценено количество итераций, после которых можно уверенно говорить, что процесс становится стационарным. Экспериментальные вычисления показали: чтобы процесс стал стационарным и, следовательно, эргодичным, достаточно 6000 итераций. Это означает, что после этого числа итераций свойства случайного процесса переходящих запасов топлива и других характеристик модели анализа надежности топливоснабжения можно оценивать путем усреднения вырабатываемых по итерациям показателей.

Ключевые слова: запасы топлива многолетнего регулирования, марковский процесс, метод Монте-Карло, надежность топливоснабжения, энергетические плантации, эргодичность.

Информация о статье. Дата поступления 31 мая 2018 г.; дата принятия к печати 29 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Губий Е.В. Математическая модель анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов биомассой с энергетических плантаций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 102–113. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-102-113

MATHEMATICAL MODEL TO ANALYZE RELIABILITY OF REMOTE SETTLEMENT FUEL SUPPLY WITH BIOMASS FROM ENERGY PLANTATIONS

E.V. Gubiy

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the study is development of mathematical models to study the mechanisms for improving a reliable fuel supply of remote settlements with biomass from energy plantations. **METHODS.** Monte Carlo method is used to solve the set tasks. The methods of mathematical statistics are used to prepare the initial data. **RESULTS AND CONCLUSIONS.** Mathematical models have been developed to analyze the reliability of remote settlement fuel supply with biomass from energy plantations taking into account the influence of random factors in production, consumption and carryover fuel resources. A numerical method is presented for the formation of a random value of fuel resources of long-term regulation. It is shown that it develops a Markov sequence. We have estimated the number of iterations after which the process definitely becomes a stationary one. Experimental calculations have shown that 6000 iterations are required for the process to become stationary and ergodic. This means that after this number of iteration the properties of

¹Губий Елена Валерьевна, старший инженер лаборатории методов математического моделирования и оптимизации в энергетике, e-mail: egubiy@gmail.com
Elena V. Gubiy, Senior Engineer of the Laboratory of Methods of Mathematical Modeling and Optimization in Power Engineering, e-mail: egubiy@gmail.com



the random process of carryover fuel resources and other characteristics of the model of fuel supply reliability analysis can be estimated by averaging of the indicators produced by iterations.

Keywords: fuel resources of long-term regulation, Markov sequence, Monte Carlo method, fuel supply reliability, energy plantations, ergodicity

Information about the article. Received May 31, 2018; accepted for publication June 29, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Gubiy E.V. Mathematical model to analyze reliability of remote settlement fuel supply with biomass from energy plantations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 102–113. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-102-113 (In Russian).

Введение

Перспективы развития мировой и российской экономики на ближайшие десятилетия связаны с развитием «зеленой экономики», которая подразумевает:

- активное и рациональное использование возобновляемых ресурсов и источников энергии;
- снижение количества выбросов парниковых газов, переход к «безуглеродной» энергетике, в том числе для противодействия глобальному потеплению [1];
- снижение выбросов в окружающее пространство оксидов серы, азота, других вредных веществ;
- экономное использование ресурсов, подверженных истощению [2];
- органическое земледелие в сельском хозяйстве;
- сохранение и эффективное управление экосистемами.

Все это полностью соответствует идее создания специальных энергетических плантаций древесных или травянистых растений, биомасса которых используется для целей энергетики, тем более, что такие источники топлива не только экологичны, но и вполне могут быть рентабельны без привлечения государственных преференций. Использование такого источника энергии перспективно и, как показывают расчеты, приведенные в работах [3–5], экономически эффективно для обеспечения топливом населенных пунктов, отдаленных от транспортных магистралей.

При анализе эффективности энергетических плантаций для топливоснабжения отдаленных населенных пунктов необходимо учитывать затраты на мероприятия по

обеспечению надежности топливоснабжения из такого источника и возможные ущербы при возникновении дефицитных ситуаций [6].

В настоящей статье представлены модели для анализа надежности и оптимизации средств обеспечения надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов на основе энергетических плантаций.

В силу, прежде всего, изменчивости природно-метеорологических условий возможны значительные отклонения от среднеожидаемых значений потребности населенного пункта в топливе в данном отопительном периоде. Заранее неизвестно, насколько продолжительным и холодным будет отопительный период. Также от непредсказуемых условий, в том числе природно-метеорологических, зависит фактическая реализация урожайности энергетических плантаций. При возникновении неблагоприятных условий ввиду повышенной потребности или пониженного объема производства топлива возможны ситуации дефицита топлива, что будет сопровождаться экономическими ущербами, обусловленными необходимостью дорогостоящих экстренных поставок дополнительно топлива в данный населенный пункт.

Кроме указанных двух случайных экзогенных показателей следует учитывать еще величину запасов топлива, переходящих из закончившегося отопительного периода в следующий. Если расход топлива в очередную зиму окажется ниже среднего значения (зима была теплая) и (или) урожайность на энергетической плантации



оказалась выше среднеожидаемой, то производство топлива в данном году может превысить потребность, и разность между производством и потреблением переходит в качестве переходящего запаса на следующий отопительный период.

Необходимо использовать специальные модели анализа и синтеза надеж-

ности. Под синтезом надежности понимается оптимизация состава средств обеспечения надежности. В качестве таких средств будем рассматривать резервы мощности в производстве топлива и склады для хранения переходящих запасов топлива.

Случайные факторы в процессах топливоснабжения с энергетических плантаций

Накопленные за многие десятилетия наблюдений метеорологические данные² позволяют оценить вероятность наступления теплых и холодных зим. Возможные случайные отклонения потребности в топливе относительно среднего ожидаемого уровня могут быть определены на основе данных отклонений интегральной разности температур внутри и вне здания за предшествующие годы [7]:

$$b_{\tau} = B_{\tau} / \bar{B}, \tau = 1, \dots, T, \quad (1)$$

где B_{τ} – расчетное значение интегральной разности температур внутри и вне зданий за отопительный период τ , в свою очередь рассчитываемое по формуле

$$B_{\tau} = \sum_{\chi=1}^{N_{\tau}} (\hat{t} - t_{\tau\chi}), \tau = 1, \dots, T. \quad (2)$$

Здесь $\hat{t}$ – нормативное значение температуры внутри здания; $t_{\tau\chi}$ – температура наружного воздуха в день χ отопительного периода τ ; $\bar{B}$ – среднее арифметическое значение показателя интегральной разности температур B_{τ} за прошлые отопительные периоды $\tau = 1, \dots, T$.

Если отопительный период τ был относительно теплым ($B_{\tau} < \bar{B}$), то величина b_{τ} меньше единицы. Если отопительный период был холоднее среднего ожидаемого ($B_{\tau} > \bar{B}$), то величина b_{τ} больше единицы. Использование относительной величины b_{τ} позволяет оценить законы вероятностей потребности в топливе.

В предлагаемой автором модели анализа надежности в качестве случайных реализаций потребности в топливе данного года используется произведение случайно выбираемых относительных отклонений интегральной разности температур за один из прошлых отопительных периодов на величину средней ожидаемой потребности в топливе данного населенного пункта.

Для описания законов вероятностей отклонений в производстве топлива пока нет надежной статистической базы, поэтому было использовано описание в виде усеченного нормального закона распределения с математическим ожиданием производства топлива $\bar{R}$, которое является оптимизируемой величиной. Заданными также являются величина среднеквадратического отклонения σ и коэффициенты δ_1, δ_2 , определяющие интервал возможных значений $[R_1, R_2]$ случайной величины

²Булыгина О.Н., Разуваев В.Н., Александрова Т.М. Описание массива данных суточной температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (TTTR): свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2014620942 [Электронный ресурс]. URL: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных> (04.06.2017) / Bulygina O.N., Razuvaev V.N., Aleksandrova T.M. Description of the array of air temperature and precipitation data at meteorological stations in Russia and the former USSR (TTTR): certificate of state registration of the database No. 2014620942. Available at: <http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#description-of-mass-data> (accessed 04 June 2017).

производства топлива. Границы этих интервалов задаются по правилам:

$$R_1 = \delta_1 \bar{R}; \quad (3)$$

$$R_2 = \delta_2 \bar{R}. \quad (4)$$

Случайная величина переходящих запасов топлива формируется на базе алгоритма, реализующего марковский процесс изменения этих запасов.

Модели анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

На рис. 1 представлена система вложенных моделей, разработанных для анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций. Рассмотрены три последовательно вложенные модели: имитационная модель функционирования систем топливоснабжения, модель анализа надежности и модель синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций. В этих моделях рассматриваются три случайные величины: годовая потребность в топливе, годовой объем производства топлива, переходящие

запасы топлива.

Экзогенными для расчетов являются:

– величина математического ожидания годовой потребности в топливе $\bar{Q}$, принимаемая равной потребности при средних природно-метеорологических условиях (рассчитывается согласно «Методическим рекомендациям по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства»³);

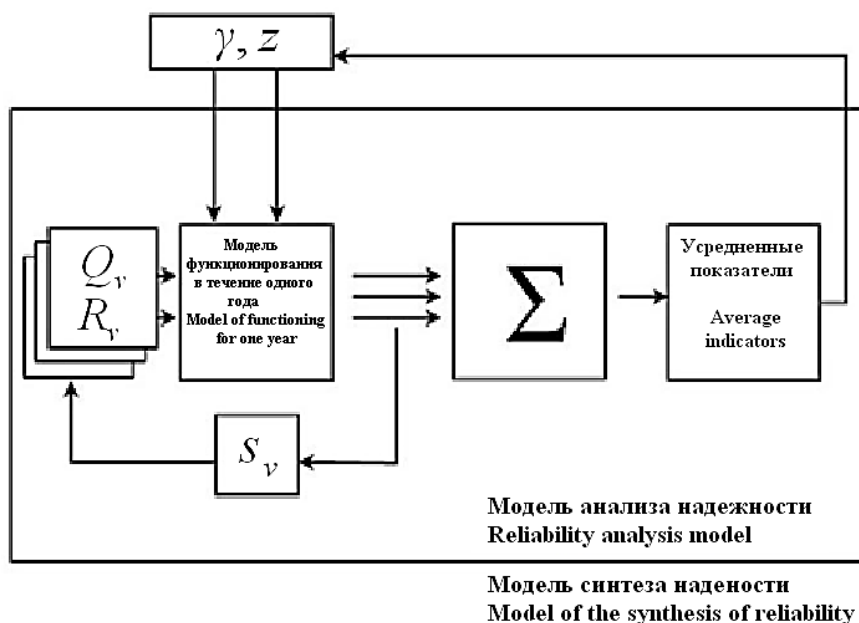


Рис. 1. Система вложенных моделей для анализа и синтеза надежности топливоснабжения с энергетических плантаций

Fig. 1. System of nested models for the analysis and synthesis of reliability of fuel supply from energy plantations

³Методические рекомендации по формированию нормативов потребления услуг жилищно-коммунального хозяйства; утв. приказом Минэкономки РФ от 06.05.1999 г. № 240 / Methodological recommendations on the formation of consumption standards for housing and utility sector; approved by the Order of the Ministry of Economics of the Russian Federation of 6 May 1999 no. 240.



– относительные отклонения потребности в топливе от математического ожидания, рассчитываемые по формуле (1);

– дисперсия усеченного нормального закона распределения случайной величины отклонений в производстве топлива от математического ожидания объемов производства σ ;

– удельные ущербы от дефицита топлива μ ;

– удельные потери при хранении топлива в течение года α .

Верхний уровень системы вложенных моделей представляет собой модель оптимизации состава средств обеспечения надежности (синтеза надежности) топливоснабжения.

В качестве средств обеспечения надежности топливоснабжения с энергетических плантаций рассматривается создание резервов мощности в производстве топлива γ и складов с коэффициентом емкости z для хранения запасов топлива многолетнего регулирования. Величины γ и z являются оптимизируемыми показателями. Обе эти переменные рассматриваются здесь как безразмерные величины и определяются относительно значения математического ожидания потребности в топливе.

Под резервом мощностей понимается превышение математического ожидания производства котельно-печного топлива $\bar{R}$ над математическим ожиданием потребности в топливе $\bar{Q}$:

$$\gamma = \frac{(\bar{R} - \bar{Q})}{\bar{Q}}. \quad (5)$$

В модели синтеза надежности решается двухпараметрическая задача оптимизации:

$$F(\gamma, z) \rightarrow \min, \quad (6)$$

$$\gamma \geq 0, \quad z \geq 0. \quad (7)$$

Здесь $F(\gamma, z)$ – функция математи-

ческого ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита. Ее значение определяется в результате расчетов на модели анализа надежности топливоснабжения.

Оптимизация осуществляется методом покоординатного спуска путем сопоставления значений функции $F(\gamma, z)$ при последовательном варьировании значения каждого из аргументов. Эта итерационная процедура осуществляется до тех пор, пока оптимальные значения перестанут существенно изменяться по итерациям.

Модель анализа надежности топливоснабжения биомассой с энергетических плантаций основывается на многократной имитации функционирования систем топливоснабжения в течение одного года. При этом номера итераций имитации обозначим как $v = 1, \dots, V$, а остатки топлива на конец отопительного периода – u_v . Значение u_0 задается на интервале $[0, z\bar{Q}]$.

В имитационной модели функционирования систем топливоснабжения с энергетических плантаций в течение одного года используется датчик случайных чисел, который выбирает значения относительных отклонений интегральной разности температур b_v , рассчитываемых по формуле (1). Затем рассчитывается случайная величина потребности в топливе:

$$Q_v = b_v \bar{Q}. \quad (8)$$

Также на основе метода Монте-Карло определяется величина объема производства топлива R_v при заданных параметрах $\bar{R}$, σ , δ_1 , δ_2 по усеченному нормальному закону распределения.

Величина запасов, переходящих в следующий отопительный период, определяется исходя из известной величины остатков топлива предыдущего отопительного периода:

$$s_v = \min\{(1 - \alpha)u_{v-1}; z\bar{Q}\}, \quad v = 1, \dots, V. \quad (9)$$



В этом выражении учитываются потери при хранении топлива в течение года α и тот факт, что запасы не могут превышать величину емкости складов $z\bar{Q}$.

Величина располагаемых ресурсов топлива определяется как сумма произведенной биомассы и запасов, перешедших из предыдущего отопительного периода:

$$RR_v = R_v + s_v. \quad (10)$$

В тех случаях, когда потребность превышает располагаемые ресурсы, образуется дефицит топлива. В противном случае дефицит равен нулю:

$$D_v = (Q_v - RR_v)_+. \quad (3.17)$$

Здесь и далее функция $(x)_+$ от вещественного x является неотрицательной срезкой:

$$(x)_+ = \max\{0, x\}. \quad (11)$$

Остаток топлива образуется, когда потребность в топливе меньше располагаемых ресурсов:

$$u_v = (RR_v - Q_v)_+. \quad (12)$$

В результате работы модели, имитирующей функционирование системы топливоснабжения с энергетических плантаций в течение одного года, определяется величина прироста затрат, связанных с созданием средств обеспечения надежности на данной итерации v . Обозначим эту величину $\Delta C_v(\gamma, z)$. На этом итерация, имитирующая прохождение одного года, завершается.

В рамках модели анализа надежности топливоснабжения с энергетических плантаций осуществляется V итераций.

После прохождения всех итераций рассчитываются следующие показатели надежности:

1) математическое ожидание дефицита:

$$MD = \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V D_v; \quad (13)$$

2) оценка вероятности появления дефицитных ситуаций:

$$PD = \frac{TD}{V}, \quad (14)$$

где TD – количество номеров испытаний, при которых возникает дефицит, рассчитываемое в свою очередь по формуле

$$TD = \sum_{v=1}^V \text{sgn}(D_v). \quad (15)$$

Здесь

$$\text{sgn}(D_v) = \begin{cases} 1, & \text{если } D_v > 0 \\ 0, & \text{если } D_v \leq 0; \end{cases} \quad (16)$$

3) математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита:

$$F(\gamma, z) = MY + \frac{1}{V} \sum_{v=1}^V \Delta C_v(\gamma, z). \quad (17)$$

Здесь MY – математическое ожидание ущербов от дефицита, рассчитываемое как

$$MY = \mu MD, \quad (18)$$

где μ – удельные ущербы от дефицита, млн руб. за т у.т.

Удельные ущербы от дефицита – это ущербы, возникающие в результате дефицита единицы топлива. Далее в данной работе в качестве удельных ущербов принимается стоимость одной т у.т. привозного топлива (угля) при его экстренной поставке.



Апробация модели

Результаты исследований представим на модели анализа надежности теплоснабжения на примере, близком к природно-метеорологическим условиям Ольхонского района.

Пусть математическое ожидание потребности в топливе $\bar{Q}$ составляет 6350 т у.т. (соответствует потребности в топливе для отопления населенного пункта с примерной численностью населения 6000 человек). Применим коэффициент потерь при хранении топлива, равный 0,1. Пусть продуктивность энергетической плантации составляют 5 т у.т. с га [8–11], стоимость строительства складов для хранения биомассы – 0,0001 млн руб. за м³, предельные затраты на производство биомассы – 0,0026 млн руб. за т у.т. [12].

Удельные ущербы от дефицита приняты равными 9 тыс. руб. за т у.т. Они состоят из стоимости угля и стоимости его транспортировки до места сжигания. Стоимость угля крупнейших месторождений Иркутской области и ближайших территорий (Черемховское, Тулунское, Жеронское, Бородинское) варьируется от 1,2 до 1,8 тыс. руб. за т, т.е. не менее 2 тыс. руб. за т у.т. Считаем, что в рамках рассматриваемой модели ситуация дефицита топлива возникает в зимний период, поэтому транспортировка топлива в Ольхонский район возможна только автомобильным транспортом. Например, средняя стоимость транспортировки угля из Иркутска в Ольхонский район (п. Еланцы) составляет около 7 тыс. руб. за т у.т.⁴ Таким образом, средняя стоимость угля при его экстренных поставках в Ольхонский район составит 9 тыс. руб. за т у.т.

Влияние фактора неопределенности в производстве топлива на надежность топливоснабжения. В настоящее время данные для оценок интенсивности и вероятностей возможных отклонений в производстве топлива отсутствуют. Поэтому будем использовать ус-

ченный нормальный закон с варьируемым среднеквадратическим отклонением. Рассмотрим, как влияет выбор численного значения параметра среднеквадратического отклонения на оптимальные значения средств обеспечения надежности.

Расчеты показывают, что при фиксированном составе средств обеспечения надежности математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита возрастает с увеличением среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива. Например, при фиксированных показателях коэффициента емкости складов для хранения топлива $z = 0,6$ и резерве мощности $\gamma = 0,05$ с ростом величины среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива от 10 до 20% математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита возрастают с 1,15 до 2,68 млн руб. в год. Вероятность дефицита в этом случае возрастает от 0,03 до 0,16.

Оптимальные резервы мощности и коэффициент емкости складов возрастают с ростом среднеквадратического отклонения математического ожидания производства топлива. Вместе с тем даже при очень существенном изменении этого показателя (от 10 до 20% от математического ожидания потребности в топливе) оптимальный резерв мощности ведет себя устойчиво и изменяется от 0,04 до 0,05, оптимальный коэффициент емкости складов – от 0,4 до 0,8. Поэтому в первом приближении можно считать допустимым значение среднеквадратического отклонения в 15%.

Влияние величины резерва мощности на показатели надежности топливоснабжения. В таблице показано, как изменяются основные показатели надежности топливоснабжения с изменением значения резерва мощности при фиксиро-

⁴По данным транспортно-экспедиционных компаний «Инком-Карго» и «СеверТЭК» / According to the data of transportation and shipping companies "Incom-Cargo" and "SeverTEK".



ванном коэффициенте емкости складов 0,6 и величине среднеквадратического отклонения случайной величины производства топлива 15%.

С увеличением резерва мощности повышается надежность топливоснабжения. Вероятность дефицита снижается с 0,25 до 0,05. С увеличением резерва мощности математическое ожидание ущербов от ситуации дефицита снижается, затраты на обеспечение надежности топливоснабжения возрастают. С ростом резерва мощности сначала происходит сокращение математического ожидания суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита за счет снижения последней составляющей. Затем математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и ущербов от дефицита начи-

нает возрастать вследствие превалирования в ней затрат на обеспечение надежности [13]. В точке минимума суммы двух функций (математического ожидания затрат на обеспечение надежности и математического ожидания ущербов от дефицита) резерв мощности составляет 0,05. С ростом резерва мощности математическое ожидание запасов и, следовательно, располагаемых ресурсов топлива возрастает.

При оптимальном резерве мощности вероятность дефицита составляет 0,1. Математическое ожидание суммы затрат на обеспечение надежности и математического ожидания ущербов от дефицита составляет 1,69 млн руб. в год, из них затраты на создание резервов мощности – 0,83 млн руб. в год.

**Зависимость показателей надежности топливоснабжения
от величины резерва мощности (при $z=0,6$ и $\sigma=15\%$)**

Dependence of fuel supply reliability indicators on power reserve value (at $z=0.6$ and $\sigma=15\%$)

Показатели надежности топливоснабжения	γ , доля от математического ожидания потребности в топливе								
	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
$\frac{1}{V} \sum_{v=1}^V \Delta C_v(\gamma, z)$, млн руб./год	0,25	0,42	0,58	0,75	0,91	1,08	1,24	1,41	1,57
MY , млн руб. в год	1,79	1,49	1,22	0,99	0,79	0,62	0,48	0,36	0,27
$F(\gamma, z)$, млн руб. за т у.т.	2,04	1,90	1,80	1,73	1,70	1,69	1,71	1,76	1,84
Математическое ожидание запасов топлива, т у.т.	1304	1452	1610	1773	1941	2111	2277	2436	2585
Математическое ожидание располагаемых ресурсов, т у.т.	7654	7866	8087	8314	8546	8779	9008	9231	9444
PD	0,25	0,22	0,18	0,15	0,12	0,10	0,08	0,06	0,05

**Представление переходящих запасов топлива в виде
стационарной марковской последовательности**

Изменения по итерациям $v = 0, 1, \dots, V$ переходящих запасов топлива можно представить в виде следующего правила:

$$s_{v+1} = \min \{ (1-\alpha)(L_v + s_v); z \}, \quad (19)$$

$$v = 1, \dots, V,$$

где L_v – случайная величина, равная разнице случайных величин производства и потребности в топливе:

$$L_v = R_v - Q_v. \quad (20)$$

Поскольку согласно (19) значение s_{v+1} зависит только от реализации случай-

ной величины L_v с заданными неизменными по итерациям плотностями вероятности и от уровней запасов только в предыдущей итерации s_v , то вырабатываемая алгоритмом последовательность $s_0, s_1, \dots, s_v$ является однородной марковской последовательностью [14–16].

Однородная марковская последовательность, как известно, обладает свойством сходимости к так называемым стационарным (или финитным) состояниям. В стационарном состоянии при увеличении числа итераций вероятности реализации случайной величины по итерациям не изменяются. Поэтому при расчете показателей надежности необходимо использовать такое количество итераций, которое приводит к распределению вероятностей, близкому к финитному.

Какое количество итераций необходимо для того, чтобы последовательность стала стационарной. На рис. 2 и 3 представлены результаты расчета двух показателей рассматриваемой од-

нородной марковской последовательности – среднеарифметического и стандартного отклонения от среднеарифметического значения уровней запасов. Приведены три реализации процесса с использованием разных начальных значений запасов. Как видно из графиков, представленных на рис. 2 и 3, уже после итерации $v = 6000$ среднеарифметическое значение и стандартное отклонение от среднеарифметического значения уровней запасов расходятся не более чем на 2%. Можно сделать вывод, что после этого количества итераций процесс становится стационарным и эргодичным.

Свойство эргодичности распространяется не только на случайную последовательность запасов многолетнего регулирования, но и на все показатели надежности топливоснабжения [14, 15]. Это свойство обосновывает правомочность использования формул (13), (14), (17). Для эргодичного процесса при большом количестве итераций будем получать однозначные результаты.

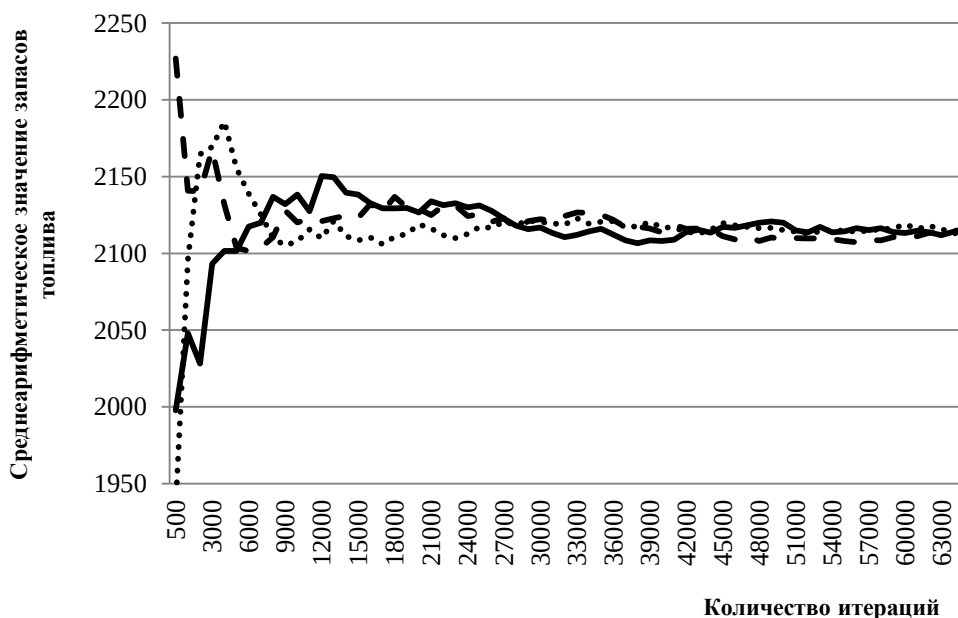


Рис. 2. Изменение по итерациям среднеарифметического значения для трех реализаций случайного процесса изменения запасов многолетнего регулирования

Fig. 2. Variation in the iterations of the arithmetic mean value for three implementations of the random process of changing the fuel resources of long-term regulation

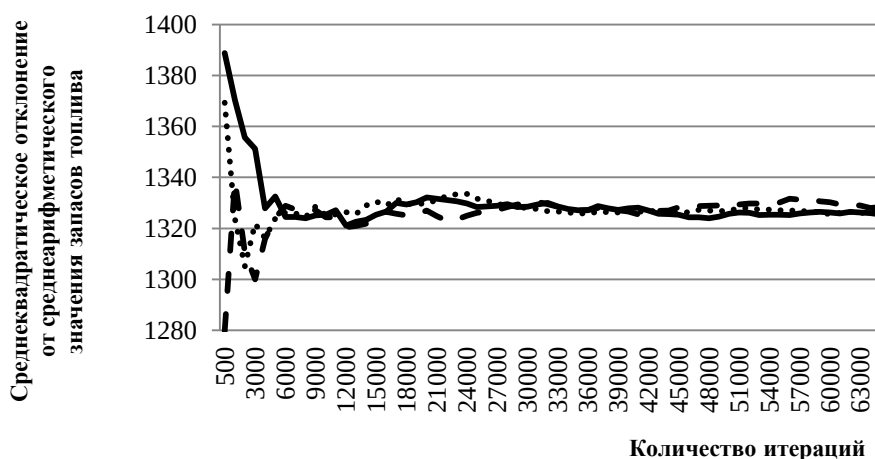


Рис. 3. Изменение по итерациям среднеквадратического отклонения от среднеарифметического значения для трех реализаций случайного процесса изменения запасов многолетнего регулирования
Fig. 3. Variation in the iterations of the standard deviation from the arithmetic mean value for three implementations of the random process of changing the fuel resources of long-term regulation

Гистограмма распределения запасов топлива многолетнего регулирования. После многократного расчета запасов многолетнего регулирования в стационарном состоянии можем построить гистограмму распределения этих запасов. Гистограмма для случая $z = 0,5$; $\gamma = 0,06$ представлена на рис. 4. Здесь максимальный запас топлива равен емкости складов и составляет в данном случае 3811 т у.т. Весь интервал распределения запасов многолетнего регулирования разделен на 10 равных подинтервалов. Повышенные вероятности запасов наблюдаются в пер-

вом и последнем подинтервалах. Повышенная вероятность запасов в первом подинтервале связана с возникновением ситуаций дефицита в некоторых случаях. Повышенная вероятность запасов в последнем подинтервале связана с возникновением ситуаций, когда образуются излишки топлива. Центральная часть гистограммы достаточно однородна.

Следует отметить, что при других значениях резерва мощности и коэффициента емкости складов распределение вероятностей разных уровней запасов топлива может изменяться.

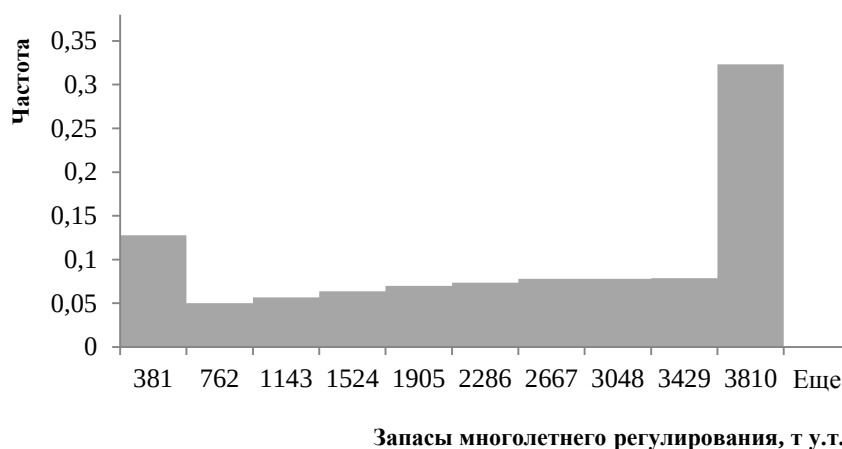


Рис. 4. Гистограмма распределения запасов топлива многолетнего регулирования
Fig. 4. Distribution histogram of fuel resources of long-term regulation



Заключение

Разработаны математические модели для анализа надежности топливоснабжения отдаленных населенных пунктов с энергетических плантаций с учетом действия случайных факторов в производстве, потреблении и переходящих запасов топлива.

Представлен численный метод формирования случайной величины запасов топлива многолетнего регулирования. Показано, что он вырабатывает марковскую последовательность. Оценено количество итераций, после которых можно уверенно говорить, что процесс стал стационарным. Экспериментальные вычисления показали, что для того, чтобы процесс стал стационарным и, следовательно, эр-

годичным, достаточно 6000 итераций. Это означает, что после этого числа свойства случайного процесса переходящих запасов топлива и, следовательно, других характеристик модели анализа надежности можно оценивать путем усреднения вырабатываемых по итерациям показателей.

Исследования выполняются при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Иркутской области (грант № 17-410-380003).

Работа выполнена в рамках научного проекта III.17.4.4 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310436-7.

Библиографический список

1. The science of climate change: Questions and Answers [Электронный ресурс] // Australian Academy of Science, Canberra, 2015. 44 p. Available at: <https://www.science.org.au/files/userfiles/learning/documents/climate-change-r.pdf> (25.12.217).
2. Панцхава Е.С. Биоэнергетика. Мир и Россия. Биогаз: Теория и практика. М.: Русайнс, 2014. 972 с.
3. Губий Е.В., Зоркальцев В.И. Оценка эффективности энергетических плантаций для теплоснабжения отдаленных населенных пунктов // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 24–28 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. С. 100–105.
4. Родькин О.И., Бутыко А.А., Пашинский В.А., Иванова Е.В. Энергетическое использование клона ивы корзиночной *Salix viminalis* valetas gigantia (Turbo) // Энергоэффективность. 2014. № 5. С. 14–18.
5. Djordjevic S.J. Assessment of Conditions and Experience for Plantation of Agro-Energy Crops on Degraded Agricultural Land in Serbia // World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering. 2016. Vol. 10. No. 7. P. 447–450.
6. Прохоров Д.В. Энергетическая безопасность населенных пунктов в условиях Крайнего Севера // Энергобезопасность и охрана труда. 2014. № 3 (57). С. 5–7.
8. Цивенкова Н.М., Самылин А.А. Быстрорастущие плантации тополя – новая энергетическая сырьевая база // ЛесПромИнформ. 2005. № 8 (30). С. 58–63.
9. Павличенко В.В. Генно-инженерный подход к созданию быстрорастущих форм древесных растений // Экосистемы озера Байкал и Восточной Азии: материалы Всерос. науч. конф. с междунар. участием (Иркутск, 10–11 октября 2014 г.). Иркутск: Изд-во ИГУ, 2014. С. 72–75.
10. Voinikov V.K. Application of somaclonal variability to production of fast-growing trees as a raw material for biofuel // Journal of stress physiology & biochemistry. 2012. Vol. 8. No. 3. P. 24.
11. Энциклопедия систем жизнеобеспечения. Знания об устойчивом развитии. В 3 т. Т. 2. Ред. Е.Е. Демидова, А.М. Лельчук, С.И. Григорьев. М.: Магистр-пресс. 2005. 1208 с.
12. Kiseleva S., Rafikova J., Shakun V. Estimating Renewable Energy Resources of Russia: Goals and Perspectives // 2nd European Energy Conference. Maastricht, the Netherlands. April 17–20, 2012. EPJ Web of Conferences. 2012. Vol. 33. <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20123301003>.
13. Губий Е.В., Зоркальцев В.И. Анализ надежности топливоснабжения населенных пунктов биотопливом с энергетических плантаций // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: материалы Междунар. науч. семинара им. Ю.Н. Руденко. Вып. 64. Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы (Иркутск, 10–15 июля 2013 г.). Иркутск: Изд-во ИСЭМ им. Л.А. Мелентьева СО РАН. 2014. С. 267–274.
14. Гихман И.И., Скороход А.В. Теория случайных процессов. Т. 1. М.: Наука, 1971. 666 с.
15. Бендат Дж., Пирсол А. Измерение и анализ случайных процессов; пер. с англ. М.: Мир, 1971. 408 с.
16. Феллер В. Введение в теорию вероятностей и ее приложения. 2-е изд., стер.; пер. с англ. Р.Л. Добрушина, А.А. Юшкевича и С.А. Молчанова; под ред. Е.Б. Дынкина. М.: Мир, 1967. Т. 1. 498 с.



References

1. The science of climate change: Questions and Answers. Australian Academy of Science, Canberra, 2015. 44 p. Available at: <https://www.science.org.au/files/userfiles/learning/documents/climate-change-r.pdf> (accessed 25 December 2017).
2. Pankhava E.S. *Bioenergetika. Mir i Rossiya. Biogaz: Teoriya i praktika* [Bioenergetics. World and Russia. Biogas: Theory and Practice]. Moscow: Rusains Publ., 2014, 972 p. (In Russian).
3. Gubiy E.V., Zorkal'cev V.I. *Otsenka effektivnosti energeticheskikh plantacii dlya teplosnabzheniya ot dalennykh naselennykh punktov* [Estimation of energy plantation efficiency for remote settlement heat supply]. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyakh Sibiri"* [Materials of All-Russian scientific and practical conference with international participation "Improving efficiency of energy production and use in Siberia"]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2017, pp. 100–105. (In Russian).
4. Rod'kin O.I., But'ko A.A., Pashinskij V.A., Ivanova E.V. Energy use of the willow clone by *Salix viminalis* valetas gigantia (Turbo). *Energoeffektivnost'* [Energy Efficiency]. 2014, no. 5, pp. 14–18. (In Russian).
5. Djordjevic S.J. Assessment of Conditions and Experience for Plantation of Agro-Energy Crops on Degraded Agricultural Land in Serbia // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering*. 2016, vol. 10, no. 7, pp. 447–450.
6. Prokhorov D.V. Energy safety in Far North settlements. *Energobezopasnost' i okhrana truda* [Energy Safety and Labor Protection]. 2014, no. 3 (57), pp. 5–7. (In Russian).
7. Gubiy E.V. Analysis long-term of variation of air temperature for the purpose of energy reliability. The international conference «Advanced mathematics, computations and applications – 2014». Novosibirsk: Akademizdat Publ., 2014, pp. 56–57. (In Russian).
8. Tsivenkova N.M., Samylin A.A. Rapidly growing poplar plantations as a new energy source. *LesPromInform* [Lesprom Inform. Professional Woodworking Journal]. 2005, no. 8 (30), pp. 58–63. (In Russian).
9. Pavlichenko V.V. *Genno-inzhenernyi podkhod k sozdaniyu bystrorastushchih form drevesnykh rastenii* [Genetic engineering approach to the creation of fast-growing forms of woody plants]. *Materialy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Ekosistemy ozera Baikal i Vostochnoi Azii"* [Materials of the All-Russian scientific Conference with international participation "Ecosystems of Lake Baikal and East Asia"]. Irkutsk: IGU Publ., 2014, pp. 72–75. (In Russian).
10. Voinikov V.K. Application of somaclonal variability to production of fast-growing trees as a raw material for biofuel. *Journal of stress physiology & biochemistry*. 2012, vol. 8, no. 3, pp. 24.
11. *Enciklopediya sistem zhizneobespecheniya. Znaniya ob ustoichivom razvitii* [Encyclopedia of life support systems. Knowledge about sustainable development]. In 3 volumes. Vol. 2. Editors E.E. Demidova, A.M. Lelchuk, S.I. Grigoriev. Moscow: Magistr-press Publ., 2005, 1208 p. (In Russian).
12. Kiseleva S., Rafikova J., Shakun V. Estimating Renewable Energy Resources of Russia: Goals and Perspectives. 2nd European Energy Conference. Maastricht, the Netherlands. April 17–20, 2012. EPJ Web of Conferences. 2012, vol. 33. <http://dx.doi.org/10.1051/epjconf/20123301003>.
13. Gubiy E.V., Zorkal'cev V.I. Analiz nadezhnosti toplivsnabzheniya naselennykh punktov biotoplivom s energeticheskikh plantacii [Analysis of reliability of settlement fuel supply with biofuel from energy plantations]. *Materialy Mezhdunarodnogo nauchnogo seminar im. Yu.N. Rudenko "Metodicheskie voprosy issledovaniya nadezhnosti bol'shikh sistem energetiki"*. Issue 64 "Nadezhnost' sistem energetiki: dostizheniya, problemy, perspektivy" [Materials of the International scientific seminar named after Yu.N. Rudenko "Methodological issues of reliability study of large energy systems"]. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS Publ., 2014, pp. 267–274. (In Russian).
14. Gikhman I.I., Skorokhod A.V. *Teoriya sluchainykh processov* [Theory of random processes]. Vol. 1. Moscow: Nauka Publ., 1971, 666 p. (In Russian).
15. Bendat Dzh., Pirsol A. *Izmerenie i analiz sluchainykh protsessov* [Measurement and analysis of random processes]. Moscow: Mir Publ., 1971, 408 p.
16. Feller V. *Vvedenie v teoriyu veroyatnostei i ee prilozheniya* [Introduction to probability theory and its applications]. Moscow: Mir Publ., 1967, vol. 1, 498 p.

Критерии авторства

Губий Е.В. провела исследование, подготовила статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Gubiy E.V. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.311:005.519.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-114-122>

О ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕПЛОВОЙ СХЕМЫ ТЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕПЛООВОГО НАСОСА

© Н.Ю. Курнакова¹, А.В. Нуждин², А.А. Волхонский³

Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова,
346428, Российская Федерация, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В данной статье рассмотрена возможность повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС за счет установки парокомпрессионных тепловых насосов (ПКТН) и абсорбционных тепловых насосов (АБТН). Рассматриваемый проект предполагает установку десяти ПКТН или двух АБТН в цикл работы ТЭС для увеличения ее энергоэффективности. Произведен расчет тепловой схемы электростанции, а также расхода воды и пара в различных узлах тепловой схемы, сведен материальный и энергетический баланс. В части расчета показателей тепловой экономичности определен КПД энергоблока и расход натурального топлива. Во второй части работы определено необходимое количество установок тепловых насосов парокомпрессионного или абсорбционного типов, определен показатель тепловой экономичности энергоблока ТЭС с ПКТН и АБТН. **МЕТОДЫ.** Расчеты тепловой схемы ТЭС с турбиной К-325-23,5 производились на основании методических указаний. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В работе произведены расчеты тепловой схемы ТЭС без применения и с применением тепловых насосов (абсорбционных и парокомпрессионных). В результате проведенного сравнительного анализа было установлено, что применение парокомпрессионного теплового насоса в технологическом цикле ТЭС может способствовать увеличению установленной мощности электростанции от 269,74 до 271,34 МВт, а ее абсолютный КПД – на 0,7%. Применение абсорбционного теплового насоса в технологическом цикле ТЭС способствует увеличению мощности электростанции от 269,75 до 365,61 МВт, а ее абсолютный КПД – на 2,6%. **ВЫВОДЫ.** При расчете тепловой схемы ТЭС с турбиной К-325-23,5 наибольшее повышение энергоэффективности тепловой схемы ТЭС достигается в результате установления на конденсатор паровой турбины двух абсорбционных тепловых насосов с паровым обогревом.

Ключевые слова: тепловые электрические станции, абсорбционный тепловой насос, парокомпрессионный тепловой насос, повышение энергоэффективности.

Информация о статье. Дата поступления 11 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 11 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Курнакова Н.Ю., Нуждин А.В., Волхонский А.А. О возможности повышения энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с применением теплового насоса // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 114–122. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-114-122

ON THE POSSIBILITY TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF THE CHP HEAT BALANCE DIAGRAM USING A HEAT PUMP

N.Yu. Kurnakova, A.V. Nuzhdin, A.A.Volkhonsky

¹Курнакова Наталья Юрьевна, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, e-mail: kurnatalya82@mail.ru

Natalia Yu. Kurnakova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of Thermal Power Plants and Heat Engineering, e-mail: kurnatalya82@mail.ru.

²Нуждин Андрей Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций и теплотехники, e-mail: a.nugdin@yandex.ru

Andrei V. Nuzhdin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Thermal Power Plants and Heat Engineering, e-mail: a.nugdin@yandex.ru

³Волхонский Александр Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобилей и транспортно-технологических комплексов, e-mail: vollkc@mail.ru

Alexander A. Volkhonsky, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automobiles, Transport and Technological Complexes, e-mail: vollkc@mail.ru



Platov South-Russian State Polytechnic University (NPI),
132, Prosveshcheniya St., Novocherkassk, 346428, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. This article discusses the possibility of increasing the efficiency of the heat balance diagram of the thermal power plant through the installation of steam compression heat pumps and absorption heat pumps. The project under consideration involves the installation of ten steam compression heat pumps or two absorption heat pumps in the operation cycle of a thermal power plant to increase its energy efficiency. The CHP heat balance diagram as well as the water and steam flow rate in the various elements of the heat balance diagram are calculated. The material and energy balance is drawn up. The section of heat efficiency indices calculation deals with the determination of power generating unit efficiency and natural fuel consumption. The second part of the work is devoted to the determination of the necessary number of installations of steam compression or absorption type heat pumps. The index of thermal efficiency of the CHP power generating unit with steam compression heat pumps and with absorption heat pumps is determined as well. **METHODS.** The heat balance diagram of a thermal power plant with the turbine K-325-23.5 has been calculated on the basis of methodical instructions. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The paper presents the calculations of the CHP heat balance diagram with and without the application of heat pumps (absorption and steam compression). The conducted comparative analysis allows to find out that the use of steam compression heat pump in the CHP technological cycle can increase the installed capacity of the power plant from 269.74 to 271.34 MW, and its absolute efficiency by 0.7 %. The use of the absorption heat pump in the CHP technological cycle allows to increase the power plant capacity from 269.75 to 365.61 MW, and its absolute efficiency by 2.6%. **CONCLUSIONS.** When calculating the heat balance diagram of a thermal power plant with the turbine K-325-23.5 the highest energy efficiency of the CHP heat balance diagram is achieved when two absorption heat pumps with steam heating are installed on the steam turbine condenser.

Keywords: thermal power plants, absorption heat pump, steam compression heat pump, improving energy efficiency

Information about the article. Received April 11, 2018; accepted for publication June 11, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Kurnakova N.Yu., Nuzhdin A.V., Volkhonsky A.A. On the possibility to improve the energy efficiency of the CHP heat balance diagram using a heat pump. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 114–122. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-114-122 (In Russian).

Введение

Известно, что при оценке экономической эффективности ТЭС наиболее значительными являются потери теплоты в конденсаторах паровых турбин. В конденсационных турбоустановках с циркуляционной водой в окружающую среду сбрасывается до 60–70% общей теплоты на турбоустановку [1].

Одним из примеров использования данной теплоты является применение тепловых насосных устройств для рекуперации энергетического потенциала сбросных низкотемпературных потоков, имеющих в достаточном количестве в технологической схеме ТЭС [2, 3]. В этом случае традиционно теряемая с циркуляционной водой теплота конденсации пара или сбросная теплота, отводимая с жидкостями, охлаждающими энергетическое оборудование, может быть преобразована в тепловом насосе и повторно использована, например, для подогрева подпиточной химически очищенной

воды, подогрева магистральной воды в тепловых сетях для отопления и горячего водоснабжения помещений станции и пристанционного поселка.

На сегодняшний день существует два основных принципиально разных вида тепловых насосов – абсорбционный (АБТН) и парокомпрессионный (ПКТН) [4, 5]. Эти установки имеют как преимущества, так и недостатки по сравнению друг с другом.

Тепловые насосы (ТН) на тепловых электрических станциях могут использоваться следующим образом:

- при включении в систему регенерации ТН может перекачивать тепло, теряемое в конденсаторе паровой турбины, в подогреватели низкого давления; в данном случае получаем повышение экономичности за счет снижения потерь в конденсаторе паровой турбины [6];

- для подогрева сетевой воды: так же, как и в первом случае, тепло перекачи-



вается из конденсатора, но уже не на подогрев основного конденсата, а направляется в линию теплофикации [7].

Исследуем повышение энергоэффективности с применением ПКТН и АБТН.

В данной работе рассматривается тепловая электрическая станция мощностью 1 300 МВт, использующая в качестве топлива длиннопламенный уголь Кузнецкого угольного бассейна. Электростанция состоит из 4 энергоблоков сверхкритических параметров, на каждом из которых установлена турбина типа К-325-23,5 производства Харьковского турбогенераторного завода «Турбоатом» (ХТЗТ).

На рис. 1 представлена тепловая схема энергоблока с турбиной К-325-23,5 ХТЗ. В состав энергоблока входят: прямой паровой котел, паровая турбина, конденсатор, блочная обессоливающая установка, смеситель, 3 регенеративных подогревателя высокого давления, 3 подогревателя низкого давления поверхностного типа и 2 подогревателя низкого давления смешивающего типа. Станция покрывает отопительную нагрузку 20 МВт по графику 130–60 посредством сетевой водогрейной установки, состоящей из двух сетевых подогревателей.

Главной особенностью рассматриваемой электростанции является реализация бездеаэрационной тепловой схемы, что позволяет повысить надежность и эффективность работы энергоблоков. Использование бездеаэрационной схемы влечет за собой отсутствие выпара деаэратора.

В результате расчета тепловой схемы получили:

- мощности турбоагрегата –
 $\sum N_i = 269741,8 \text{ кВт.};$
- расход теплоты на турбоустановку –
 $Q_{\text{ту}} = 592176,0 \text{ кВт.};$
- абсолютный электрический КПД турбоустановки (брутто) за вычетом мощности турбоприводов собственных нужд –
 $\eta_{\text{ту}}^a = 0,456.$

Следующим этапом работы являлось проведение оценки влияния установки теплового насоса на энергетическую эф-

фективность цикла энергоблока [8, 9].

В любой конденсационной электростанции самым большим источником низкопотенциальной энергии является конденсатор паровой турбины, где в процессе конденсации отработавшего пара теряется до 2/3 теплоты, полученной в паровом котле. Как известно, одним из способов повышения КПД цикла электростанции является снижение конечных параметров пара, поэтому в современных конденсационных электростанциях температура пара в конденсаторе поддерживается на уровне 26–35°C. Такую температуру невозможно полезно использовать ни для каких целей. Поэтому предлагается поднять ее потенциал с помощью теплового насоса до параметров, с которыми данную теплоту можно будет использовать полезно, подняв тем самым тепловую экономичность цикла энергоблока [10].

Энергетическая целесообразность применения ТН заключается в коэффициенте преобразования, который показывает отношение полученной теплоты, которую можно полезно использовать, к затраченной энергии:

$$K = Q_{\text{ПОЛЕЗ}} / Q_{\text{ЗАТР}} > 1.$$

Коэффициент преобразования теплового насоса всегда >1 и в идеальных условиях для современных типов может достигать 10.

Для включения в систему регенерации или сетевых подогревателей по температурному режиму подходят парокомпрессионные и абсорбционные тепловые насосы. На станции есть возможность использовать отборы пара турбины в качестве высокопотенциального источника, что дает возможность применения АБТН и ПКТН.

Так как наибольшим низкопотенциальным источником является конденсатор паровой турбины, то целесообразно подключить ТН к конденсатору, замыкая контур циркуляции испарителя теплового насоса на теплообменный пучок труб, расположенных в конденсаторе паровой турбины.

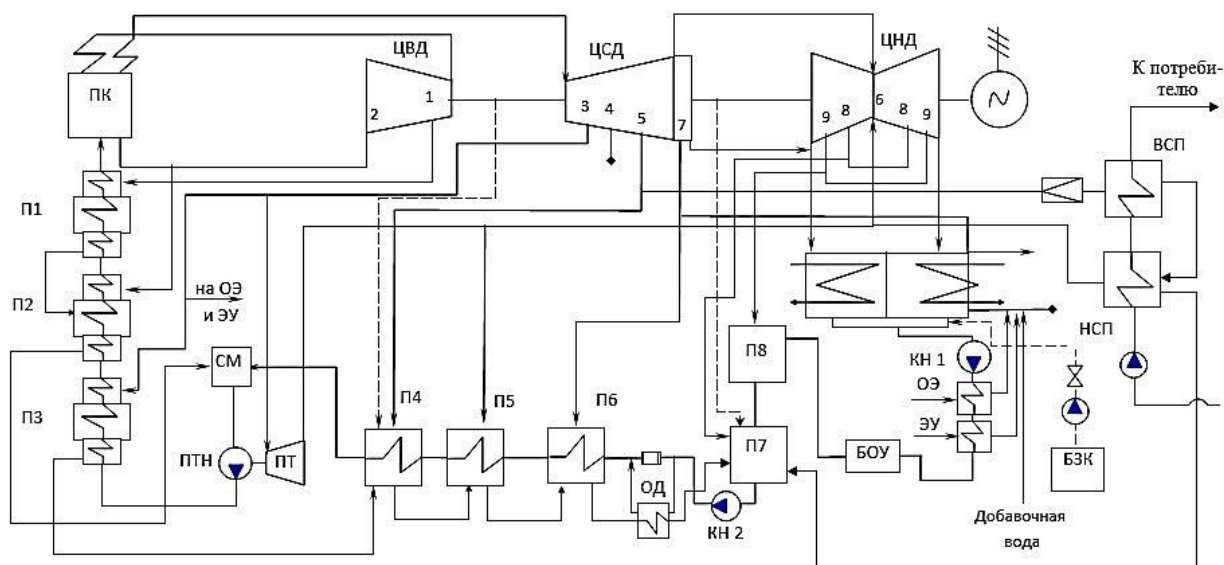


Рис. 1. Принципиальная бездеаэраторная тепловая схема энергоблока с турбиной К-325-23,5
Fig. 1. Schematic no-deaerator heat balance diagram of the power generating unit with the turbine K-325-23.5

Поскольку был выбран парокомпрессионный тепловой насос, позволяющий давать температуру теплоносителя не более 70°C, то его можно подключить только к подогревателю смешивающего типа ПНД8.

На рис. 2 представлена принци-

альная схема блока с турбиной К-325-23,5
ХТГЗ, оснащенная ПКТН.

Подключаем ТН к конденсатору, за-
мыкаем контур циркуляции испарителя
теплого насоса на теплообменный пучок
трубок, расположенных в конденсаторе па-
ровой турбины.

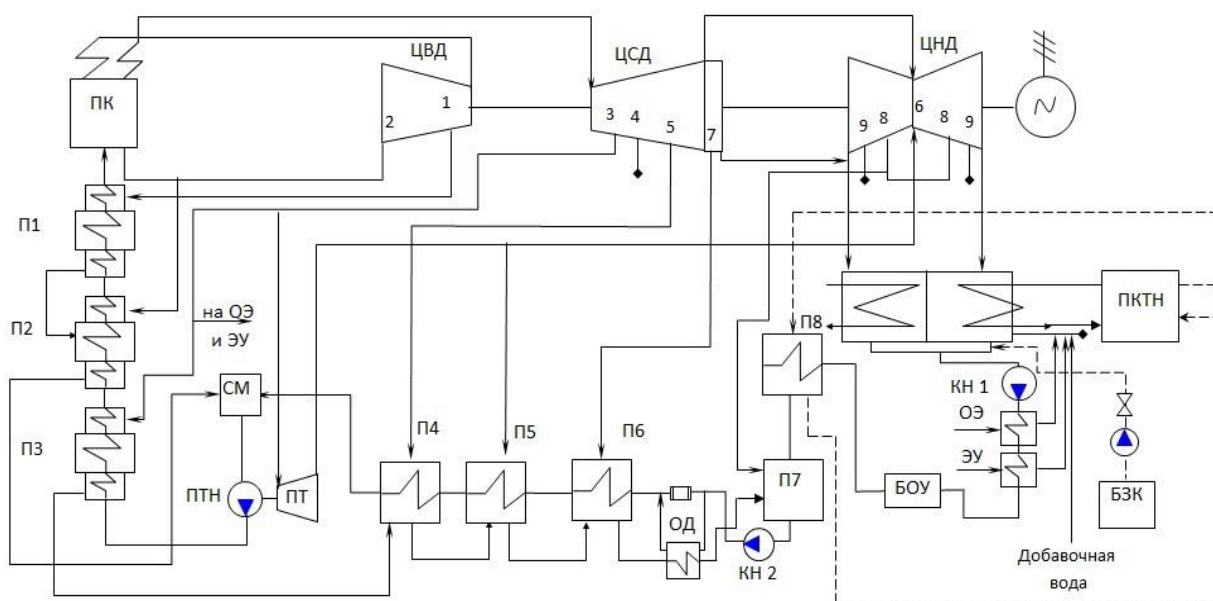


Рис. 2. Принципиальная схема турбоустановки К-325-23,5, оснащенная ПКТН
Fig. 2. Schematic diagram of the turbine plant K-325-23.5 equipped with a steam compression heat pump



Необходимая тепловая мощность теплового насоса определится как мощность, которую необходимо подвести в подогреватель смешивающего типа ПНД8, чтобы нагреть основной конденсат до той же температуры, что и была до этого за счет отбора пара из турбины: $Q_{TH} = 19894,96$ кВт.

Для эксперимента выбираем тепловой насос KWT 2000 (на сегодняшний день фирма KWT – швейцарский производитель тепловых насосов большой мощности (до 1500 кВт), является подразделением немецкого концерна Viessmann).

Для обеспечения необходимой мощности устанавливаем 10 одинаковых ПКН.

В результате расчета тепловой схемы ТЭС с ПКН получаем следующие значения основных параметров:

- мощность турбоагрегата – $\sum N_{oi} = 271348,4$ кВт.;
- абсолютный электрический КПД турбоустановки (брутто) – $\eta_{TV}^a = 0,463$.

Применение ПКН для утилизации теплоты конденсатора в системе регенерации на блоке с турбиной К-325-23,5 ХТЗТ приводит к увеличению абсолютного электрического КПД (брутто) на 0,7% в абсолютном соотношении.

Повышения эффективности турбоустановки можно добиться путем перевода турбогенераторов на работу с ухудшенным вакуумом. В этих условиях альтернативным решением по переходу на ухудшенный вакуум может быть применение абсорбционных бромисто-литиевых тепловых насосов [11, 12]. С их помощью обеспечивается более эффективное решение той же задачи блокирования рассеяния тепловой энергии с циркуляционной водой, при этом не требуется каких-либо изменений конструкции турбоустановки [13–15].

В тепловой схеме турбоустановки существует несколько тепловых потоков, рассеиваемых в окружающей среде, часть из которых направляется в АБТН для утилизации. Для работы АБТН потребляется теплота пара, потребность в которой опре-

деляется отопительным коэффициентом АБТН. Сетевой воде передается поток тепловой энергии мощностью 19,3 МВт, нагревая ее на 25°C.

Для эффективного использования тепловых насосов в условиях электростанции целесообразнее всего подключать их к самому энергоемкому источнику низкопотенциальной теплоты – конденсатору паровой турбины.

Производственный отбор пара от турбины будет обеспечивать отпуск пара на производство, а теплофикацию будет обеспечивать тепловой насос, подключенный к конденсатору паровой турбины. Предлагается использовать абсорбционный тепловой насос производства ООО «ОКБ Теплосибмаш». АБТН нуждается в паровом обогреве, который можно осуществлять из производственного отбора 5. Тепловой насос необходимо выбирать с учетом отопительной мощности и давления пара на обогрев, поскольку давление пара на производство строго регламентировано. Дренаж пара, обогревающего АБТН, возвращается обратно в цикл станции и поступает перед подогревателем смешивающего типа ПНД7.

На рис. 3 представлена принципиальная схема блока с турбиной К-325-23,5 ХТГЗ, оснащенная АБТН.

Для восприятия всей теплоты конденсатора выбрано два тепловых насоса: АБТН-3000П и АБТН-4000П. В данном проекте предлагается использование абсорбционного теплового насоса производства ООО «ОКБ Теплосибмаш».

Отвод оставшейся теплоты, если таковая будет присутствовать, осуществится с помощью циркуляционной воды прямой системы охлаждения. Поскольку тепловые насосы способны нагревать сетевую воду только до 90°C, то в тепловой схеме турбоустановки с установленным АБТН для подогрева сетевой воды будет произведено подключение нижнего сетевого подогревателя (НСП) к конденсационному контуру абсорбционного теплового насоса.

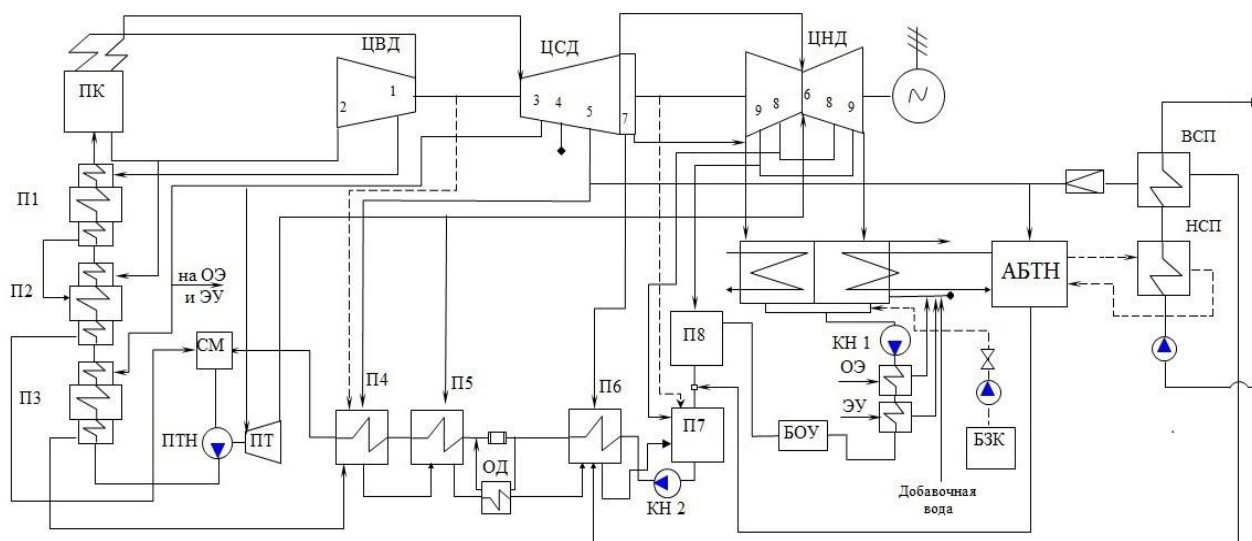


Рис. 3. Принципиальная схема турбоустановки К-325-23,5, оснащенная АБТН
Fig. 3. Schematic diagram of the turbine plant K-325-23.5 equipped with an absorption heat pump

В результате расчета тепловой схемы ТЭС с АБТН получим:

- мощность турбоагрегата – $\sum N_{oi} = 365613,12$ кВт.;
- расход теплоты на турбоустановку – $Q_{TV} = 757937,9672$ кВт.;
- абсолютный электрический КПД турбоустановки (брутто) – $\eta_{TV}^a = 0,482$.

Применение АБТН для утилизации теплоты в конденсаторе паротурбоустанов-

ки с передачей ее системе сетевых подогревателей тепловой схемы ТЭС с турбиной К-325-23,5 может способствовать увеличению абсолютного электрического КПД (брутто) турбоустановки в абсолютных единицах на 2,6%.

Результаты проведенного сравнительного анализа применения ПКТН и АБТН в технологическом цикле ТЭС представлены в виде гистограмм на рис. 4.

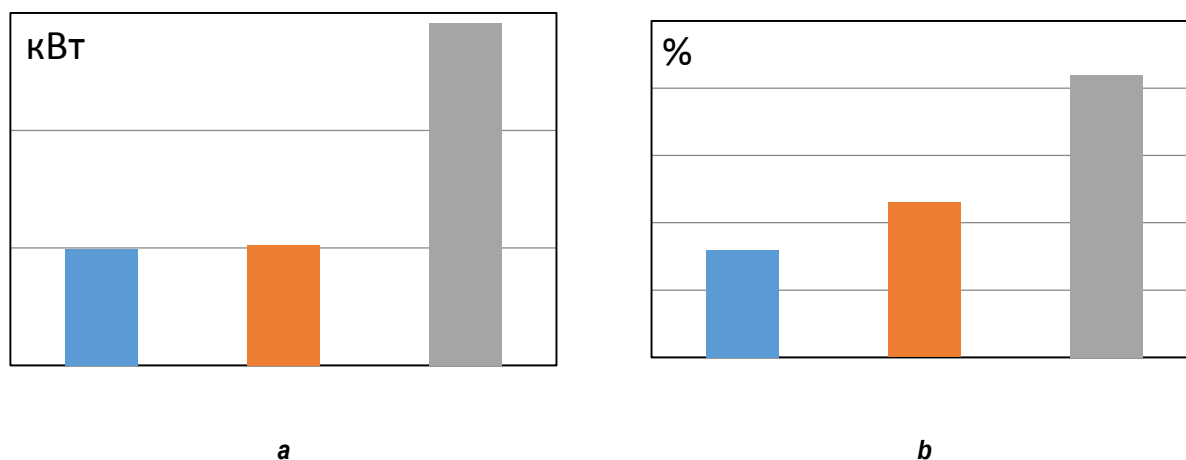


Рис. 4. Изменение мощности (а) и КПД (б) турбоустановки ТЭС с применением тепловых насосов
Fig. 4. Change in power (a) and efficiency (b) of the CHP turbine plant using heat pumps



Таким образом, по результатам расчетов было установлено, что применение ПКТН в технологическом цикле ТЭС может способствовать увеличению установленной мощности электростанции от 269,74 до 271,34 МВт, а ее абсолютного КПД – на

0,7%. Использование в технологическом цикле ТЭС АБТН приводит к увеличению мощности электростанции от 269,75 до 365,61 МВт, а ее абсолютного КПД – на 2,6%.

Выводы

Таким образом, наибольшее повышение энергоэффективности тепловой схемы ТЭС с турбиной К-325-23,5 производства Харьковского турбогенераторного завода «Турбоатом» достигается в результате установления на конденсатор паровой турбины двух абсорбционных тепловых насосов АБТН-3000П и АБТН-4000П произ-

водства ООО «ОКБ Теплосибмаш» с паровым обогревом.

На основании полученных данных можно заключить, что для повышения энергоэффективности работы ТЭС с турбиной К-325-23,5 целесообразным является применение именно АБТН.

Библиографический список

1. Чиркин Н.Б., Кузнецов М.А., Шерстов Е.В., Стеников В.Н. Потенциальная возможность и техническая рациональность применения теплонасосных технологий при комбинированном производстве электрической и тепловой энергии // Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17. № 1. С. 11–20.
2. Скубиенко С.В., Янченко И.В., Бабушкин А.Ю. Анализ возможностей использования тепловых насосов при производстве тепловой и электрической энергии на ТЭС и АЭС // Кибернетика энергетических систем: сборник материалов XXXVIII сессии Всерос. научного семинара по тематике «Диагностика энергооборудования» (Новочеркасск, 17–19 октября 2016 г.). Новочеркасск: Изд-во Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) им. М.И. Платова, 2016. С. 330–336.
3. Байбаков С.А. Энергетическая эффективность использования тепловых насосов в конденсационных паросиловых циклах // Энергетик. 2014. № 1. С. 28–35.
4. Ильющенко В.А., Смирнов А.В. Применение тепловых насосов на тепловых электростанциях // Научно-техническое творчество аспирантов и студентов: материалы 46-й науч.-техн. конф. студентов и аспирантов (Комсомольск-на-Амуре, 01–15 апреля 2016 г.). Комсомольск н/А: Изд-во Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, 2016. С. 233–235.
5. Орехов И.И., Тимофеевский Л.С., Караван С.В. Абсорбционные преобразователи теплоты. Л.: Химия, 1989. 208 с.
6. Папин В.В., Ефимов Н.Н. Перспективы использования тепловых насосов в энергетике [Электронный ресурс]. URL: [http://don-tech.ru/wp-content/up-](http://don-tech.ru/wp-content/uploads/2014/05/Perspektivy-ispolzovaniya-TN.pdf)
- loads/2014/05/Perspektivy-ispolzovaniya-TN.pdf (17.03.2018).
7. Аникина И.Д., Сергеев В.В. Применение тепловых насосов для повышения энергоэффективности паросиловых ТЭС // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. 2013. № 3 (178). С. 56–61.
8. Буров В.Д., Дудолин А.А., Ильина И.П., Олейникова Е.Н., Седлов А.С., Тимошенко Н.И. Оценка эффективности применения тепловых насосов на парогазовых ТЭС // Вестник Московского энергетического института. 2013. № 3. С. 44–50.
9. Чиркин Н.Б., Кузнецов М.А., Шерстов Е.В., Стеников В.Н. Потенциальная возможность и техническая рациональность применения теплонасосных технологий при комбинированном производстве электрической и тепловой энергии // Проблемы машиностроения. 2014. Т. 17. № 1. С. 11–20.
10. Чепурной М.Н., Резидент Н.В. Применение парокompрессионных теплонасосных установок для утилизации сбросной теплоты конденсаторов паровых турбин // Научные труды Винницкого национального технического университета. 2013. № 4. С. 8.
11. Перминова А.Ю. Абсорбционные тепловые насосы [Электронный ресурс]. URL: <http://www.bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/education/4779-2.pdf> (17.03.2018).
12. Шидловская Д.К., Седелников Г.Д. Применение абсорбционных тепловых насосов в тепловой схеме турбоустановки Т-180/210-130 [Электронный ресурс] // Международный студенческий научный вестник: электронный научный журнал. 2016. № 3 (ч. 2). URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14933> (17.03.2018).



13. Романюк В.Н., Муслина Д.Б., Бобич А.А., Коломыцкая Н.А., Бубыр Т.В., Мальков С.В. Абсорбционные тепловые насосы в тепловой схеме ТЭЦ для повышения ее энергетической эффективности [Электронный ресурс] // Энергия и менеджмент. Журнал для энергетиков. 2013. № 1 (70). URL: <http://broad-ctx.by/stati/absorbcionnye-teplovye-nasosy-v-teplovoj-sxeme-tyec> (17.03.2018).
14. Скубиенко С.В., Янченко И.В. Исследование тепловой экономичности ТЭС с турбоустановкой К-300-240-2 ХТГЗ и абсорбционным тепловым насо-

сом при переменных режимах работы // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2015. № 2. С. 30–35.

<https://doi.org/10.17213/0321-2653-20152-30-35>

15. Ефимов Н.Н., Янченко И.В., Скубиенко С.В. Энергетическая эффективность использования абсорбционного бромисто-литиевого теплового насоса в тепловых схемах ТЭС // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2014. № 1. С. 17–21.

References

1. Chirkin N.B., Kuznecov M.A., Sherstov E.V., Stennikov V.N. Potential possibility and technical rationality of using heat pump technologies at the combined production of electric and thermal energy. *Problemy mashinostroeniya* [Problems of Mechanical Engineering]. 2014, vol. 17, no. 1, pp. 11–20. (In Russian).
2. Skubienko S.V., Yanchenko I.V., Babushkin A.Yu. *Analiz vozmozhnostej ispol'zovaniya teplovyh nasosov pri proizvodstve teplovoj i elektricheskoy energii na TES i AES* [Analysis of the possibilities to use heat pumps in the production of thermal and electric energy at CHP and NPP]. Kibernetika energeticheskikh sistem: sbornik materialov XXXVIII sessii Vserossiiskogo nauchnogo seminar po tematike "Diagnostika energooborudovaniya" [Cybernetics of power systems: Collection of materials of XXXVIII session of the all-Russian scientific workshop on "Diagnosis of power equipment"]. Novocherkassk: Platov South Russian State Polytechnic University Publ., 2016, pp. 330–336.
3. Baibakov S.A. Energy efficiency of using heat pumps in condensing steam power cycles. *Energetik* [Energetik]. 2014, no. 1, pp. 28–35. (In Russian).
4. Il'yushenko V.A., Smirnov A.V. *Primenenie teplovyh nasosov na teplovyh elek-trostanciyah* [Use of heat pumps in thermal power plants]. *Materialy 46-i nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov "Nauchno-tekhnicheskoe tvorchestvo aspirantov i studentov"* [Proceedings of 46th scientific and technical conference of students and postgraduate students: Scientific and technical creativity of postgraduate students and students]. Komsomol'sk-na-Amure: Komsomol'sk-na-Amure State Technical University Publ., 2016, pp. 233–235. (In Russian).
5. Orekhov I.I., Timofeevskii L.S., Karavan S.V. *Absorbcionnye preobrazovateli teploty* [Absorption heat transformers]. Leningrad: Chemistry Publ., 1989, 208 p. (In Russian).
6. Papin V.V., Efimov N.N. *Perspektivy ispol'zovaniya teplovyh nasosov v energetike* [Prospects for using heat pumps in the energy sector]. Available at: <http://don-tech.ru/wp-content/uploads/2014/05/Perspektivy-ispolzovaniya-TN.pdf> (accessed 17 March 2018).
7. Anikina I.D., Sergeev V.V. Heat pumps' application for energy efficiency rising of steam-power HPP. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudartsvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Computer Science. Telecommunication and Control Systems]. 2013, no. 3 (178), pp. 56–61. (In Russian).
8. Burov V.D., Dudolin A.A., Il'ina I.P., Olejnikova E.N., Sedlov A.S., Timoshenko N.I. Assessment of heat pump application efficiency for steam-powered thermal power plants. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta* [MPEI Vestnik]. 2013, no. 3, pp. 44–50. (In Russian).
9. Chirkin N.B., Kuznecov M.A., Sherstov E.V., Stennikov V.N. Potential possibility and technical rationality of heat pumping technologies application at the combined production of electric and thermal energy. *Problemy mashinostroeniya* [Problems of Mechanical Engineering]. 2014, vol. 17, no. 1, pp. 11–20. (In Russian).
10. Chepurnoj M.N., Rezydent N.V. Application of steam compression heat pump units for steam turbine condenser waste heat utilization. *Nauchnye trudy Vinnitskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Works Of Vinnytsia National Technical University]. 2013, no. 4, pp. 8.
11. Perminova A.Yu. *Absorbcionnye teplovye nasosy* [Absorption heat pumps]. Available at: <http://www.bibl.nngasu.ru/electronicresources/uch-metod/education/4779-2.pdf> (accessed 17 March 2018).
12. Shidlovskaya D.K., Sedel'nikov G.D. Application of absorption heat pumps in the heat circuit of T-180/210-130 turbine. *Mezhdunarodnyj studencheskij nauchnyj vestnik: elektronnyj nauchnyj zhurnal* [Electronic scientific journal "International student scientific journal"]. 2016, no. 3 (part 2). Available at: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=14933> (accessed 17 March 2018).
13. Romanyuk V.N., Muslina D.B., Bobich A.A., Kolomyckaya N.A., Bubyр T.V., Mal'kov S.V. Absorption heat pumps in CHPP thermal circuit for increasing its energy efficiency. *Energiya i menedzhment. Zhurnal dlya energetikov* [Energy and Management. Journal for Power Engineers]. 2013, no. 1 (70). Available at:



<http://broad-ctx.by/stati/absorbcionnye-teplovye-nasosy-v-teplovoj-sxeme-tyec> (accessed 17 March 2018).

14. Skubienko S.V., Yanchenko I.V. Investigation of the thermal efficiency of thermal power plant with the K-300-240. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. The North Caucasus Region. Series: Technical Sciences]. 2015, no. 2, pp. 30–35. [https://doi.org/10.17213/0321-](https://doi.org/10.17213/0321-2653-20152-30-35)

2653-20152-30-35. (In Russian).

15. Efimov N.N., Yanchenko I.V., Skubienko S.V. Energy efficiency of using absorption lithium bromide heat pump in the heat balance diagrams of a thermal power plant. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Severo-Kavkazskii region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of Higher Educational Institutions. The North Caucasus Region. Series: Technical Sciences]. 2014, no. 1, pp. 17–21. (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.



Обзорно-аналитическая статья / Analytical review article
УДК 621.321
DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-123-146>

К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКАМИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

© Р.А. Петухов¹, Е.Ю. Сизганова¹, Н.В. Сизганов², А.Н. Филатов¹

¹Сибирский федеральный университет,
660041, Российская Федерация, г. Красноярск, пр-кт Свободный, 79.

²ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики»,
660074, Российская Федерация, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, 9а.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В данной работе представлен анализ нормативно-правового обеспечения проблемы компенсации реактивной мощности и экономического стимулирования коррекции коэффициента реактивной мощности в России, а также анализ исследований в области управления потоками реактивной мощности в системах электроснабжения. **МЕТОДЫ.** Проведена аналитическая экспертиза способов компенсации реактивной мощности. Процедура получения оценки проблемы автоматизации управления потоками реактивной мощности основана на мнении экспертов с целью последующего принятия решения. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Обоснована необходимость автоматизации управления потоками реактивной мощности с использованием управляющих свойств автоматизированной системы контроля и учета электрической энергии. **ВЫВОДЫ.** Повышение качества управления режимом реактивной мощности требует перехода к активно-адаптивным системам управления. Высокоадаптивным решением с необходимыми эксплуатационными характеристиками и высокой экономической эффективностью является применение средств СТАТКОМ для управления компенсацией реактивной мощности на стороне 10 кВ в совокупности с управлением РПН трансформаторов в центре питания, что позволит автоматизировать управление потоками реактивной мощности в системах электроснабжения предприятия.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, оптимизация, активно-адаптивные элементы, SMART GRID, система электроснабжения, трансформатор, компенсирующее устройство, СТАТКОМ, энергосистема, уровень напряжения, коэффициент мощности.

Информация о статье. Дата поступления 20 мая 2018 г.; дата принятия к печати 20 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Петухов Р.А., Сизганова Е.Ю., Сизганов Н.В., Филатов А.Н. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электроснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 123–146. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-123-146

TO THE PROBLEM OF AUTOMATED CONTROL OF REACTIVE POWER FLOWS IN ELECTRICAL ENERGY SUPPLY SYSTEMS

R.A. Petukhov, E.Yu. Sizganova, N.V. Sizganov, A.N. Filatov

¹Петухов Роман Алексеевич, старший преподаватель кафедры электротехнических комплексов и систем, e-mail: rom_pet1@mail.ru

Roman A. Petukhov, Senior Lecturer of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems, e-mail: rom_pet1@mail.ru

²Сизганова Евгения Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем, e-mail: YSizganova@sfu-kras.ru

Evgeniya Yu. Sizganova, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems, e-mail: YSizganova@sfu-kras.ru

³Сизганов Никита Вячеславович, инженер-исследователь отдела математического моделирования, e-mail: vitz1234@gmail.com

Nikita V. Sizganov, Research Engineer of the Department of Mathematical Modeling, e-mail: vitz1234@gmail.com

⁴Филатов Алексей Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры электротехнических комплексов и систем, e-mail: AFilatov@sfu-kras.ru

Aleksey N. Filatov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Electrotechnical Complexes and Systems, e-mail: AFilatov@sfu-kras.ru



Siberian Federal University,
79, Svobodny pr., Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation
"Magnetic Hydrodynamics SPC" LLC,
9a, Academician Kirensky St., Krasnoyarsk, 660074, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. This work presents the analysis of the regulatory and legal support of the problem of reactive power compensation and economic incentives for the correction of the reactive power factor in Russia, as well as the analysis of researches in the field of control of reactive power flows in power supply systems. **METHODS.** The analytical expertise of reactive power compensation methods is carried out. The procedure of obtaining an assessment of the problem of reactive power flow automated control is based on the expert opinion with a view to the subsequent decision-making. **RESULTS.** The need for the automation control of reactive power flows by using the monitoring properties of the automated control and accounting system of electrical energy is substantiated. **CONCLUSIONS.** Improvement of the quality of reactive power mode control requires a transition to active-adaptive control systems. A highly adaptive solution with the necessary operating characteristics and high economic efficiency is the use of STATCOM tools to control reactive power compensation on the 10 kV side together with the load-sensing transformer control at the power center, which will allow to automate the control of reactive power flows in the company's power supply systems.

Keywords: reactive power compensation, optimization, active-adaptive elements, SMART GRID, power supply system, transformer, compensating device, STATCOM, power system, voltage level, power factor

Information about the article. Received May 20, 2018; accepted for publication June 20, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Petukhov R.A., Sizganova E.Yu., Sizganov N.V., Filatov A.N. To the problem of automated control of reactive power flows in electrical energy supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 123–146. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-123-146 (In Russian).

Ведение

Для промышленных предприятий эффективность потребления электрической энергии определяется своевременным обеспечением технологического процесса требуемым количеством электроэнергии заданного качества при наименьших потерях и при условии сохранения надежной устойчивой работы электроприемников. Наиболее значимой частью мероприятий по повышению эффективности электропотребления до сих пор является снижение потерь за счет регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности (КРМ).

КРМ позволяет повысить эффективность использования электроэнергии в трех основных направлениях: увеличение пропускной способности линий и трансформаторов, снижение потерь активной энергии, нормализация напряжения. Установка компенсирующих устройств (КУ) позволяет снизить активные потери за счет снижения полного тока. Таким образом, КРМ может быть в полной мере названа одной из технологий энергосбережения. Даже на предприятиях, где нет проблем с перегрузкой электросетевого оборудования, за счет снижения актив-

ных потерь мероприятия по КРМ окупаются за сравнительно короткий период времени.

По величине коэффициента реактивной мощности можно судить о том, какая часть потребляемой энергии полезно используется для совершения работы. В возможном приближении коэффициента мощности приемных устройств к единице и заключается в основном технико-экономическая проблема КРМ.

Для возможности регулирования потоков реактивной мощности (РМ) при обеспечении допустимых государственными стандартами уровней напряжения в распределительных сетях промышленных предприятий и устойчивости нагрузки необходима разработка централизованной и адаптивной системы управления параметрами средств регулирования, способной мгновенно оценивать параметры текущего режима, находить актуальные причинно-следственные законы функционирования электрической системы, управлять группой разнообразных элементов системы с большим количеством свойств, также меняющихся со временем.



Хронология нормативно-правового обеспечения проблемы КРМ

Нормативы, касающиеся потребления предприятиями РМ, берут начало в 1930-е гг. на фоне активной индустриализации в СССР. Первый норматив подразумевал повышение основного критерия экономичности электроустановок – коэффициента мощности ($\cos\varphi$) промышленных предприятий на границах балансовой принадлежности с 0,815 до 0,85. В 1943 г. за низкий $\cos\varphi$ уже была введена надбавка к тарифу на электроэнергию. В 1951 г. был издан документ «О повышении коэффициента мощности электроустановок промышленных предприятий», а в 1961 г. он был переработан и назван «Руководящие указания по повышению коэффициента мощности». В 1975 г. введены «Указания по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях», которые были ориентированы не на максимальное повышение $\cos\varphi$, а на обеспечение минимума приведенных затрат на электросеть и компенсирующие устройства [1]. В то время это было настоящим достижением в области нормативного регулирования.

В 1981 г. Министерством энергетики и электрификации СССР была утверждена «Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях»⁵, согласно которой, контроль за фактическим потреблением реактивной мощности должен был осуществляться у потребителей с заявленной мощностью более 750 кВА в режимах минимальных и максимальных нагрузок, для остальных величина потребляемой реактивной мощности должна была определяться расчетом. Величины реактивной мощности, которые необходимо было компенсировать потребителю, определялись для каждого квартала в режимах максимальных и минимальных нагрузок на основании экономически обоснованной реактивной нагрузки в узле,

рассчитанной энергоснабжающей организацией для получения оптимального народнохозяйственного эффекта. От выполнения/невыполнения указаний потребителю начислялась скидка/надбавка к тарифу за активную электроэнергию.

С 1 января 1992 г. Приказом Минтопэнерго РФ от 14 июля 1992 г. № АД-3866/19 Главгосэнергонадзор ввел в действие новую редакцию подраздела 2.3 «Правил пользования электрической энергией» в целях приведения его в соответствие с Прейскурантом № 09-01, утвержденным постановлением Госкомцен СССР от 28.02.1990 г. № 152. Данный документ определял начисление пени за несвоевременную оплату абсолютной величины потребленной или выработанной реактивной мощности.

Как показал проведенный анализ, развитие производства и электроэнергетической системы (ЭЭС) в России привело к тому, что начисление надбавок за превышение средневзвешенного коэффициента мощности превратилось в оплату абсолютной величины реактивной мощности, отличающейся от целесообразной для энергосистемы (потребляемой в часы максимальных нагрузок и вырабатываемой в часы минимальных нагрузок) с учетом народнохозяйственного эффекта для производителей, транспортировщиков и потребителей электрической энергии. На основании такого руководящего документа были разработаны методики по расчету КРМ в электрических сетях, основанные на получении народнохозяйственного эффекта. Переход к другому типу экономики в стране не отменял данный механизм КРМ за счет потребителей до 2001 г.

В процессе реформирования электроэнергетики и разработки новой нормативной базы в 2001 г. была отменена «Ин-

⁵Инструкция по системному расчету компенсации реактивной мощности в электрических сетях; утв. Министерством энергетики и электрификации СССР. М.: СПО Союзтехэнерго, 1981. 24 с. / Instruction on the system calculation of reactive power compensation in electric networks; approved by the Ministry of Energy and Electrification of the USSR. Moscow: SPO Soyuztekhenenergo Publ., 1981. 24 p.



струкция о порядке расчётов за электрическую и тепловую энергию», что привело к тому, что экономических рычагов воздействия на потребителей в части начисления надбавок за завышенные коэффициенты реактивной мощности не было более девяти лет (до 2010 г.). Это было связано с переходным периодом в электроэнергетике страны, в течение которого Инструкция «вошла в противоречие с законодательными и иными правовыми актами более высокого уровня» [2]. Изменение условий функционирования электроэнергетики России, связанное с коренными изменениями политической системы страны, разделением ЭЭС на субъекты электроэнергетики по видам деятельности и переходом к рыночной схеме взаимодействия субъектов между собой, привели к тому, что методы КРМ, основанные на реализации народнохозяйственного эффекта, перестали соответствовать

современным условиям функционирования электроэнергетики^{6,7}

Вышедшие в 2010 г. «Методические указания по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов ...»⁸ привели к тому, что для потребителей с присоединенной мощностью энергопринимающих устройств более 150 кВт (за исключением бытовых и приравненных к ним потребителей) рассчитываются повышающие (понижающие) коэффициенты к тарифу и составляющая снижения тарифа по соотношению активной и реактивной мощности в часы больших суточных нагрузок⁹. При этом установленные Порядком⁹ коэффициенты РМ для потребителей, подключенных на напряжение 220 кВ и выше, могут быть изменены на основании расчетов электрических режимов для потребителей, значительно влияющих на электроэнергетические режимы работы энергосистем. Для потребителей, подклю-

⁶Об особенностях функционирования электроэнергетики и о внесении изменений в некоторые законодательные акты российской федерации и признании утратившими силу некоторых законодательных актов российской федерации в связи с принятием федерального закона «Об электроэнергетике»: федер. закон от 26.03.2003 г. № 36-ФЗ / On the operation features of the electric power sector and introduction of changes in some legislative acts of the Russian Federation and recognition of separate legislative acts of the Russian Federation void in connection with the adoption of the Federal Law "On Electric Power Industry": Federal Law of 26 March 2003 no. 36-FZ.

⁷О порядке отбора субъектов электроэнергетики и потребителей электрической энергии, оказывающих услуги по обеспечению системной надежности, и оказания таких услуг, а также об утверждении изменений, которые вносятся в акты Правительства Российской Федерации по вопросам оказания услуг по обеспечению системной надежности: постановление Правительства РФ от 03.03.2010 г. № 117 / On the selection procedure of the subjects of electric power industry and electric energy consumers that provide services on ensuring system reliability and provision of such services, as well as on the approval of changes introduced in the acts of the Government of the Russian Federation on the issues of the provision of services providing system reliability: Order of the Government of the Russian Federation of 3 March 2010 No. 117.

⁸Методические указания по расчету повышающих (понижающих) коэффициентов к тарифам на услуги по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон по договорам об оказании услуг по передаче электрической энергии по единой национальной (общероссийской) электрической сети (договорам энергоснабжения); утв. приказом Федеральной службы по тарифам от 31.08.2010 г. № 219-э/6 / Methodical guidelines for calculating raising (decreasing) coefficients to the tariffs for electric power transmission services depending on the ratio of active and reactive power consumption for individual energy receivers (groups of energy receivers) of electric energy consumers used to determine the obligations of the parties under the agreements for rendering services for the transmission of electrical energy through the single national (all-Russian) electric grid (power supply contracts); approved by the Order of the Federal Tariff Service of 31 August 2010 No. 219-e /6.

⁹Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения); утв. приказом Министерства промышленности и энергетики РФ от 22.02.2007 г. № 49 / The procedure for calculating the values of the ratio of active and reactive power consumption for individual power receivers (groups of power receivers) of electric energy consumers used to determine the obligations of the parties in the contracts for the provision of electrical energy transmission services (energy supply contracts); approved by the Order of the Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation of 22 February 2007 No. 49.



ченных на напряжение 110 кВ (154 кВ) и ниже, установлены предельные коэффициенты РМ, относительно которых рассчитываются повышающие или понижающие коэффициенты к тарифу по передаче электрической энергии в зависимости от соотношения потребления активной и реактивной мощности. При этом если потребитель участвует в регулировании потоками РМ, то для него дополнительно рассчитывается «составляющая снижения тарифа за участие потребителя в регулировании реактивной мощности».

Таким образом, изменение нормативной базы в электроэнергетике России вновь привело к тому, что появились повышающие (понижающие) коэффициенты, применяемые к тарифу на услуги по передаче электрической энергии для потребителей в зависимости от соотношений активной и реактивной мощностей. При этом заданные предельные значения коэффициентов РМ на границе балансовой принадлежности определяются только условиями надежного и качественного электроснабжения потребителей (согласно Порядку⁹). Отказ от принципов выбора КУ по инструкции⁵, обеспечивающей народнохозяйственный эффект, закреплён и в Правилах устройства электроустановок¹⁰. Седьмая редакции ПУЭ регламентирует применение КУ для обеспечения требуемой пропускной способности сети, необходимых уровней напряжений и запасов устойчивости (п.п. 1.2.24 ПУЭ).

Основным акцентом принятых и принимаемых документов в части регулирования потоками РМ является повышение надёжности электроснабжения потребителей и поддержания устойчивости ЭЭС.

В связи с продолжительным отсутствием нормативных рычагов, эффективно регулирующих потребление (выработку) реактивной мощности, и принятием нового механизма расчетов за соотношение активной и реактивной мощностей, существующие методы КРМ перестали отвечать требованиям как региональных сетевых компаний

(РСК), так и потребителей. Это подтверждает и переход от административно-командной системы в сфере управления электроэнергетикой к рыночным взаимоотношениям. Однако окончательные выводы в отношении применения имеющихся методов можно сделать только на основе анализа самих методов КРМ.

Реформирование энергосистем РФ, принятие федеральных законодательных актов об энергосбережении и энергоэффективности, разработка и реализация ряда пилотных проектов и федеральных программ по энергосбережению и т.д. пока не изменили очевидности факта, что вопросы оптимизации энергопотребления и повышения качества покупаемой электроэнергии по-прежнему остаются в компетенции самих потребителей и практически вне реальной поддержки государства в виде преференций или налоговых льгот на модернизацию локальных электросетей предприятий. Наиболее наглядным примером этому остается проблема регулирования коэффициента мощности, по факту выгодная не только потребителям, но и всей ветке поставки электроэнергии – от генерирующих структур до передачи мощностей, установленных двусторонними договорами между потребителем и сетевой организацией.

Руководство производственных и производственно-коммерческих структур оплачивает проведение энергоаудита (своим подразделениям или сторонним организациям), разработку проектов оптимизации энергопотребления путем коррекции коэффициента мощности, изыскивает финансовые возможности на приобретение и монтаж установок компенсации реактивной мощности, счетчиков потребления реактивной энергии и т.д., и все это без каких-либо механизмов финансовой поддержки со стороны государства и/или поставщиков электроэнергии. В то же время производители устройств/установок КРМ и продающие компании в качестве основного аргумента необходимости регулирования коэффициента

¹⁰Правила устройства электроустановок. 7-е изд. СПб.: ДЕАН, 2008. 704 с. / Rules for the arrangement of electrical installations. 7th edition. SPb.: DEAN, 2008. 704 p.



мощности непосредственно в потребительских сетях приводят типовые формулы «усредненных» расчетов, правомерность

применения которых вызывает сомнение, особенно с учетом изменений в правовой базе последних лет.

История экономического поощрения регулирования коэффициента мощности в РФ

В 1991 г. в России были введены надбавки за услуги по поставке РМ, что побудило потребителей корректировать коэффициент мощности. Тем не менее, в начале 2000 г. Минэнерго России было вынуждено отменить «Правила пользования электрической и тепловой энергией», а в 2001 г. – и весь пакет правовых документов, которые регулировали механизм воздействия на значения критериальных функций, путем повышения тарифа за электроэнергию в связи с явной необоснованностью доходов электросетевых организаций. После принятия в 2002 г. закона «О техническом регулировании»¹¹ исполнение требований государственных стандартов в области электроэнергетики и стандартов организаций, которые были призваны помочь потре-

бителям электроэнергии скорректировать коэффициент мощности^{12–14} и др., стало обязательным.

Восстановить контроль за перетоками РМ позволил ряд нормативно-правовых документов, принятых Правительством Российской Федерации в разные годы^{15–20}.

Согласно изменениям, внесенным в «Основные положения функционирования розничных рынков электроэнергии»¹⁶ в переходный период функционирования электроэнергетики в 2007 г., сверхнормативное потребление РМ должно оплачиваться потребителями с применением к тарифам повышающих коэффициентов.

В целом вся накопленная нормативно-правовая база была ориентирована в основном на потребителей до 1000 кВ, при

¹¹О техническом регулировании: федер. закон от 27.12.2002 г. № 184-ФЗ / On technical regulation: Federal Law of 27 December 2002 No. 184-FZ.

¹²РД 34.20.185-94. Инструкция по проектированию городских электрических сетей / RD 34.20.185-94. Instruction on the design of urban electrical networks.

¹³СО 153-34.20.118-2003. Методические указания по проектированию развития энергосистем; утв. приказом Минэнерго России от 30.06.2003 г. № 281 / SO 153-34.20.118-2003. Methodical instructions for design and development of energy systems; approved by the Order of the Ministry of Energy of Russia of 30 June 2003 no. 281.

¹⁴РД 34.20.112. Указания по выбору средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности при проектировании электроснабжения сельскохозяйственных объектов и электрических сетей сельскохозяйственного назначения / RD 34.20.112. Guidelines for selection voltage control and reactive power compensation means during the design of electric power supply systems for agricultural facilities and agricultural electrical circuits.

¹⁵Правила недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг, Правила недискриминационного доступа к услугам по оперативно-диспетчерскому управлению в электроэнергетике и оказания этих услуг, Правила недискриминационного доступа к услугам администратора торговой системы...; утв. постановлением Правительства РФ от 27.12.2004 г. № 861 (ред. от 18.04.2018 г.) / Rules for non-discriminatory access to the energy transmission services and provision of these services, the Rules for non-discriminatory access to the services for operational dispatch management in electric power industry and provision of these services, the Rules for non-discriminatory access to the services of the trading system administrator; approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 27 December 2004. No. 861 (as amended on 18 April 2013).

¹⁶Основные положения функционирования розничных рынков электрической энергии; утв. постановлением Правительства РФ от 31.08.2006 г. № 530 / The main provisions of the operation of retail electrical energy markets; approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 31 August, 2006. No. 530.

¹⁷О внесении изменений в некоторые Постановления Правительства Российской Федерации по вопросам электроэнергетики; пост. Правительства РФ от 21.03.2007 г. № 168 / On the introduction of amendments to some Resolutions of the Government of the Russian Federation on the issues of electric power industry; Order of the Government of the Russian Federation of 21 March 2007. No. 168.

¹⁸О выводе объектов электроэнергетики в ремонт и из эксплуатации; пост. Правительства РФ от 26.07.2007 г. № 484 / On taking electric power facilities out for repair and final shutdown; Order of the Government of the Russian Federation of 26 July 2007. No 484.



этом четких алгоритмов контроля соотношения потребления активной и реактивной мощностей прописано не было, а была лишь формализация заключения договоров. Кроме того, не решались проблемы экономической обоснованности доходов электросетевых организаций при введении стимулирующих добавок к оплате за электроэнергию и т.д.

Сегодня в России показателем потребления реактивной энергии, как правило, является коэффициент мощности $\cos \varphi = P / S$, а не коэффициент реактивной мощности ($\tan \varphi = Q / P$), в то время как точность $\cos \varphi$ в определении реального потребления реактивной энергии значительно ниже точности $\tan \varphi$ (табл. 1), который применяется в качестве показателя в странах ЕС и США.

Контроль над потреблением реактивной энергии возобновился с принятием Правительством РФ постановления «О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии» и «Основных положений функционирования розничных рынков электрической энергии»²¹. Однако на текущий момент реальные изменения в оплате за

потребляемые объемы мощностей касаются только потребителей с максимальной мощностью энергопринимающих устройств в границах балансовой принадлежности не менее 670 кВт, а также потребителей (покупателей), к которым применялись положения постановления Правительства РФ от 31.08.2006 г. № 530¹⁶, установленные для потребителей, присоединенная мощность энергопринимающих устройств которых в границах балансовой принадлежности превышает 750 кВА, в том числе к потребителям (покупателям) на розничных рынках, функционирующих на территориях, не объединенных в ценовые зоны оптового рынка (разд. 2 п. в).

Основными новациями можно считать [3]:

– введение терминов *максимальная мощность* («наибольшая величина мощности, определенная к одномоментному использованию энергопринимающими устройствами»¹⁵) и *резервируемая максимальная мощность* (РММ)²² (разность между максимальной мощностью энергопринимающих устройств потребителя и фактически потребленной по данным приборов учета в соответствующем расчетном периоде);

¹⁹О внесении изменений в «Правила технологического присоединения энергопринимающих устройств потребителей электрической энергии, объектов по производству электрической энергии, а также объектов электросетевого хозяйства, принадлежащих сетевым организациям и иным лицам, к электрическим сетям»: пост. Правительства РФ от 01.03.2011 г. № 129 / On amendments to the Rules for the technological connection of energy-receiving devices of electric energy consumers, electric power production facilities, and electric grid facilities belonging to network organizations and other persons and to electric networks: Order of the Government of the Russian Federation of 1 March 2011 No.129.

²⁰Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения); утв. приказом Министерства промышленности и энергетики РФ от 22.02.2007 г. № 49 / Calculation procedure of the values of the active and reactive power consumption ratio for individual power receivers (groups of power receivers) of electrical energy consumers used to determine the obligations of the parties in the contracts for the provision of electrical energy transmission services (energy supply contracts); approved by the Order of the Ministry of Industry and Energy of the Russian Federation of 22 February 2007 No. 49.

²¹О функционировании розничных рынков электрической энергии, полном и (или) частичном ограничении режима потребления электрической энергии" (вместе с «Основными положениями функционирования розничных рынков электрической энергии», «Правилами полного и (или) частичного ограничения режима потребления электрической энергии»): пост. Правительства РФ от 04.05.2012 г. № 442 / On operation of retail electrical energy markets, full and (or) partial restriction of electrical energy consumption regime (together with the "Basic Regulations for the operation of retail electrical energy markets", "Rules for the full and (or) partial limitation of the electrical energy consumption mode"): The Order of the Government of the Russian Federation of 4 May 2012 No. 442.

²²Стратегия развития электросетевого комплекса Российской Федерации; утв. распоряжением Правительства РФ от 03.04.2013 г. № 511-п / Strategy for the development of the electric grid complex of the Russian Federation; approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 3 April 2013 No. 511-r.



Таблица 1

Значение реактивной мощности (Q) в процентах от активной мощности
при разных значениях $\cos \varphi$ и $\tan \varphi$

Table 1

Reactive power value (Q) as a percentage of active power
under different values of $\cos \varphi$ and $\tan \varphi$

$\cos \varphi$	1,0	0,99	0,97	0,95	0,94	0,92	0,9	0,87	0,85	0,8	0,7	0,5	0,316
$\tan \varphi$	0,0	0,14	0,25	0,33	0,36	0,43	0,484	0,55	0,60	0,75	1,02	1,73	3,016
$Q, \%$	0,0	14	25	33	36	43	48,4	55	60	75	102	173	301,6

– включение в договоры электро-снабжения потребителей величины максимальной мощности энергоприемников, определяемой в соответствии с «Правилами недискриминационного доступа к услугам по передаче электрической энергии и оказания этих услуг»¹⁵ соответственно сетевыми организациями и гарантирующими поставщиками – в 2-месячный срок с момента принятия постановления. В проекте Постановления²³, утверждающего «Изменения, которые вносятся в акты Правительства Российской Федерации по вопросам определения услуг по передаче электрической энергии с учетом оплаты резервируемой максимальной мощности», РММ определяется как «разность между максимальной мощностью энергопринимающего устройства ... потребителя (для ... потребителя I или II категории надежности – максимальной мощностью, умноженной на 1,5) и суммарного по всем уровням напряжения

объема услуг по передаче электрической энергии...». Причем «...в случае отсутствия данных о почасовых объемах потребления электрической энергии резервируемая максимальная мощность полагается равной максимальной мощности»;

– введение с середины 2014 г. оплаты РММ, т.е. потребитель с электрическими нагрузками от 750 кВА должен оплачивать РММ по установленным тарифам или же отказаться от резерва мощности, перезаключив договор. Тогда для такого потребителя перспективное расширение производства возможно только за счет максимального использования объемов резервной мощности, в том числе за счет КРМ (и это достаточная мотивация к внедрению установок КРМ). Однако вполне вероятно, что стоимость покупки, внедрения и обслуживания, в том числе обновление установок регулирования мощности, может оказаться больше, чем затраты на оплату РММ.

Анализ способов компенсации реактивной мощности

Цель КРМ неодинакова при проектировании и эксплуатации электрических сетей. При проектировании электроэнергетических систем целью КРМ является минимизация суммарных затрат на новое строительство за счет снижения потоков реактивной мощности по элементам сети, а при эксплуатации – надёжное и качественное обеспечение потребителей электриче-

ской энергией при минимальных дополнительных вложениях, а также снижение эксплуатационных издержек.

Традиционно КРМ направлена на решение балансовой, экономической задачи и задачи регулирования напряжения.

Решение балансовой задачи подразумевает исключение дефицита реактивной мощности в системе в целом, обеспе-

²³ Об определении стоимости услуг по передаче электрической энергии с учетом оплаты резервируемой максимальной мощности: проект постановления Правительства РФ от 2014 г. / On the determination of the cost of services for electrical energy transmission taking into account the cost of the reserved maximum capacity: draft decree of the Government of the Russian Federation of 2014.



чивая требуемые уровни напряжения на шинах генераторов электрических станций. Исключение местных дефицитов реактивной мощности позволяет отрегулировать напряжения в центрах питания. Экономическая задача является оптимизационной. При ее решении наиболее часто целевой функцией являются приведенные затраты²⁴ [4–14 и др.], которые в зависимости от предложенного метода включают различное сочетание таких параметров, как стоимость компенсирующего устройства, потери активной и реактивной мощности (или энергии) в сети, отклонение напряжений у потребителей, пропускная способность элементов сети, штрафные надбавки за сверхнормативное потребление реактивной мощности, стоимость генерации реактивной мощности на электрических станциях. Для решения оптимизационных задач все приведенные составляющие записываются как функции, зависящие от генерируемой РМ, рассматриваемыми (или предлагаемыми) источниками реактивной мощности.

Различие методик КРМ заключается в постановке и условиях решаемой задачи, виде целевой функции, количестве критериев оптимизации, типе используемых исходных данных, способах поиска решения.

Несмотря на различия в подходах к проведению КРМ основные технические ограничения, используемые при ее решении, всегда включали следующие неравенства [10–13 и др.]:

$$Q_{max} \geq Q \geq Q_{min}, \quad (1)$$

где Q_{max} , Q_{min} – пределы вырабатываемой (потребляемой) реактивной мощности рассматриваемого устройства; Q – фактическое значение реактивной мощности, полученное при оптимизации;

$$U_{max} \geq U \geq U_{min}, \quad (2)$$

где U_{max} , U_{min} – максимальное и минимальное значения напряжения; U – фактическое значение напряжения;

$$\operatorname{tg} \varphi \leq \operatorname{tg} \varphi_{max}, \quad (3)$$

где $\operatorname{tg} \varphi$ – фактическое значение коэффициента мощности в сети; $\operatorname{tg} \varphi_{max}$ – допустимое значение коэффициента мощности в сети.

При наличии в рассматриваемой сети нескольких источников реактивной мощности необходимо решение задачи оптимального распределения реактивной мощности между ними для снижения суммарных затрат, то есть совместное решение балансовой и экономической задач КРМ.

Ф.Ф. Карпов предложил метод КРМ для распределительных сетей, основанный на минимизации суммарных затрат на производство и передачу реактивной мощности в рассматриваемый узел в режиме максимальных нагрузок, в котором оптимальное значение целевой функции определяется методом неопределенных множителей Лагранжа с ограничениями в виде баланса реактивной мощности в рассматриваемом узле [10]. Данный подход подразумевает, что потенциальные источники реактивной мощности могут быть любыми: «генераторы электрических станций, синхронные компенсаторы, группы синхронных двигателей и конденсаторные установки», которые в современных условиях могут принадлежать разным собственникам, что сделает невозможным использование такого подхода без учета финансового интереса каждого из собственников. Кроме того, данный подход нацелен на решение задачи «доставки» реактивной мощности до конкретного узла, а не на оптимальное распределение реактивной мощности в сети, а также не учитывает потери активной мощности в самих компенсирующих устройствах.

²⁴Туликов А.Н. Управление режимами реактивной мощности и напряжения систем электроснабжения предприятий методами искусственного интеллекта: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02. Красноярск, 2007. 171 с. / Tulikov A.N. Control of reactive power and voltage modes of power supply systems of enterprises by artificial intelligence methods: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.14.02. Krasnoyarsk, 2007. 171 p.



В учебном издании коллектива авторов²⁵ управление потоками реактивной мощности для основных сетей ЭЭС выполняется также с использованием метода неопределенных множителей Лагранжа для случая относительной независимости выработки реактивной мощности от затрат на топливо электрических станций.

Учет стоимости активной мощности в различных узлах рассмотрен в методе адресности, показанном в статье [15]. Однако крупные потребители электрической энергии в России оплачивают активную энергию с учетом повышающих или понижающих коэффициентов к тарифу в зависимости от соотношения потребляемой активной и реактивной мощности, а услуги по выработке реактивной мощности осуществляются электрическими станциями на конкурсной основе. Следовательно, использование метода адресности не по назначению, а для перераспределения потоков реактивной мощности в сети может не дать желаемых результатов.

Системный подход в классической постановке задачи поиска мест установки и мощности КУ, который первым применил Ю.С. Железко, позволил перейти к более прогрессивной методике оценки эффективности КРМ.

В работах Ю.С. Железко в качестве целевой функции используются приведенные затраты, которые в общем виде состоят из трех составляющих: затраты на электростанции системы, связанные с производством реактивной мощности, затраты на электрические сети, обусловленные передачей реактивной мощности, затраты на КУ [2, 7]. Задача решается в детерминированной постановке и не учитывает характер изменения нагрузки, что может привести к выходу решения из оптимальной области. Оптимизацию целевой функции предложено выполнять градиентным методом, используя при этом реактивные мощности режима максимальных нагрузок, а при вы-

боре нерегулируемых компенсирующих устройств – средние значения РМ. Оптимизационный алгоритм и оценка эффективности КУ строится только на эффекте снижения потерь активной мощности (энергии). Кроме того, ориентируясь на один из режимов – режим максимальных нагрузок, нельзя оптимизировать всю гамму складывающихся режимов в рассматриваемой схеме на различных временных интервалах. Однако с точки зрения подготовки исходных данных метод весьма подходит для условий эксплуатации.

Метод потенциалов затрат [13, 16 и др.] подразумевает поиск оптимального места и мощности КУ путем минимизации затрат, состоящих из трех составляющих: затраты на потери электроэнергии, затраты на генерацию существующими источниками реактивной мощности и затраты на дополнительные КУ. Дифференциал рассматриваемой части затрат по реактивной мощности узла и назван потенциалом затрат. Условие минимума функции приведенных затрат определяется с помощью частных производных по основным переменным. Дополнительная установка КУ считается целесообразной при условии, если экономический эффект от установки КУ превышает ее стоимость. При моделировании используются реактивные нагрузки узлов и активные сопротивления ветвей. Сравнение составляющих потенциалов затрат для узла позволяет определить наиболее приемлемый источник реактивной мощности. Данный подход достаточно эффективен при детерминированной постановке и зарекомендовал себя для сетей одного собственника – государства.

Стохастический характер электрических нагрузок ограничивает область его применения. Основным недостатком данного метода является использование времени потерь, что приводит к увеличению методической погрешности в расчетах потерь мощности [17].

²⁵Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Г.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: учебник для вузов М.: Энергоиздат, 1981 г. 464 с. / Venikov V.A., Zhuravlev V.G., Filippova G.A. Optimization of power plants and power systems regimes: textbook for universities. M.: Energoizdat, 1981 464 p.



В работе [13] задача оптимизации мощности, мест размещения средств компенсации реактивных нагрузок и регулирования напряжения в общем виде представлена функцией приведенных затрат, которая включает:

- затраты на дополнительные компенсирующие устройства в каждом узле;
- затраты на дополнительные устройства, которые выполняют только функции регулирования напряжения в каждом узле;
- затраты, связанные соответственно с эксплуатацией дополнительных компенсирующих и регулирующих устройств;
- затраты, связанные с потерями мощности и энергии в существующих источниках;
- ущерб, возникающий у потребителей из-за неоптимальных напряжений в каждом узле.

При этом подчеркивается неоправданная трудоемкость решения, преодолеть которую можно пренебрежением некоторых наименее значимых составляющих, поэтому в расчетах экономического эффекта учитывается эффект от снижения потерь активной и реактивной мощностей, от нормализации качества напряжения в узлах и от увеличения пропускной способности элементов сети. Все составляющие эффекта определяются через градиент соответствующей функции. Наличие трех последних составляющих эффекта зависит от степени влияния дополнительных КУ на сеть, а основополагающим является эффект от снижения потерь активной мощности. Дополнительное КУ целесообразно устанавливать в первую очередь в узлах, где функция «эффектов» максимальна. В современных условиях реактивная энергия не оплачивается по абсолютному значению, поэтому данный подход не будет работать. В [13] уже рассмотрен не один режим, а основные характерные режимы, что, безусловно, предпочтительнее. Однако при укрупнении центров питания и рыночных условий транспорта мощности количество таких режимов неограниченно увеличивается, а эффективность результата умень-

шается.

В [8] минимизируется целевая функция затрат, включающая: нормативный коэффициент эффективности и отчисления на амортизацию и ремонт; стоимость высоковольтных и низковольтных конденсаторных батарей; тариф стоимости потерь; удельные потери в конденсаторах высокого и низкого напряжений.

Согласно [8] напряжения у удаленного и ближайшего потребителя должны быть в пределах $\pm 5\%$. После установки КУ во всех узлах для обеспечения условия минимизации целевой функции затрат, методично наращивается мощность КУ в узлах, где напряжения у удаленного и ближайшего потребителя не входят в пределы $\pm 5\%$. Далее формируется новый комплексный критерий, характеризующий относительный прирост затрат с учетом режима напряжения.

Метод, приведенный в [8], позиционируется как многокритериальный, но процесс решения сводится к выполнению двух последовательных этапов: поиска мест установки и мощности КУ по условию минимизации (критерию оптимизации) и увеличения мощности КУ в узлах, где ограничение не выполняется. При рассмотрении сетей РСК, питающих множество разных по структуре и назначению потребителей, такой эффект выявить гораздо сложнее.

При решении оптимизационных задач КРМ большое внимание уделяется многоцелевой оптимизации. Это обосновывается многокритериальностью и многогранностью воздействия КУ на ЭЭС.

В работе [18] предлагается механизм многоцелевой оптимизации, основанный на минимизации целевой функции, включающей:

- приведенные народнохозяйственные затраты на установку батарей конденсаторов;
- стоимость потерь электроэнергии в элементах сети;
- ущерб от отклонения напряжений;
- надежность, оцениваемую интенсивностью отказов батарей конденсаторов;
- потери мощности в элементах се-



ти и батареях конденсаторов.

Решение многокритериальной задачи выполняется в динамике, а именно, в расчетах учитывается ежегодное увеличение нагрузки. Для каждого года расчетного периода по принятым целевым условиям методом динамического программирования определяется оптимальное распределение конденсаторных батарей с учетом режимных и технических ограничений для каждого из рассматриваемого фактора. Ранжирование целевых условий производится с помощью метода главных компонент по возрастающему вкладу в суммарную дисперсию. Поиск оптимального результата выполняется после нанесения решений на трёхмерный график, где отображаются полученные решения и используемые стандартные ограничения. В [18] реализация метода рассматривается на примере трехузловой схемы, а в условиях эксплуатации при наличии в схеме даже десятков узлов определение области решения весьма затруднительно или плохо реализуемо. Ежегодное увеличение нагрузки – фактор неопределенный, то есть заранее неизвестный прирост нагрузки при расчете на перспективу внесет в решение только дополнительную погрешность.

О.И. Ерёмин в своей диссертационной работе²⁶ в качестве критериев оптимизации использует потери электрической энергии, штрафную функцию и средневзвешенное по мощности отклонение напряжения, при поиске оптимальных решений определяет область Парето искомого вектора. Использование штрафного коэффициента в данном случае позволяет «отсеять» решения по установке КУ, которые осуществить невозможно. Однако для снижения трудозатрат целесообразно и можно исключить такие узлы до решения

оптимизационной задачи. Кроме того, поиск оптимального решения им выполняется по одному из режимов работы сети, что также не позволяет считать результат оптимальным для всего множества режимов.

Описанные выше методы КРМ можно отнести к детерминированным, так как в качестве оптимизируемого они используют один или небольшое количество характерных режимов работы рассматриваемого участка сети, и не учитывают всё множество режимов. К подобным относятся: метод динамического программирования и покоординатного спуска²⁷ [19], метод нелинейного квадратичного программирования, матрично-вычислительный метод, в которых рассматриваются только основные режимы работы энергосистемы, что не позволяет получить наилучшее решение в условиях неопределенности. Кроме того, многие из них ориентированы на использование времени потерь, что вносит дополнительную методическую погрешность.

Стохастический характер электрических нагрузок и их неопределенность приводит к невозможности принятия решения только по одному из режимов и требует использования принципиально иного подхода. Поэтому для получения наиболее приемлемого варианта решения в работах [4, 11, и др.] используют серии расчетов режимов. Например, в [4] для решения задач оптимизации режимов в целом предложено проведение серии расчетов по параметрам режима, полученным «с помощью соображений о допустимом объеме расчетов». Здесь учет неопределенности при решении задачи КРМ заключается в рассмотрении множества исходных режимов в период максимальных и минимальных нагрузок. В работе [11] аналогичный подход используется уже в непосредствен-

²⁶Ерёмин О.И. Разработка методики решения задачи компенсации реактивной мощности с использованием многоцелевой оптимизации: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.01. Н. Новгород, 2007. 116 с. / Eremin O.I. Development of the technique for solving the problem of reactive power compensation using multipurpose optimization: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.14.01. N. Novgorod, 2007. 116 p.

²⁷Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем: учебник для электроэнерг. спец. вузов. М.: Высш. шк., 1987. 272 с. / Arzamastsev D.A., Lipes A.V., Myzin A.L. Models for optimizing the development of energy systems: textbook for power engineering specialties of universities. Moscow: Higher School, 1987, 272 p.



ной задаче проведения КРМ.

Для каждого принятого набора данных (отклонения от максимумов) задача оптимизации решается в детерминированной постановке. При таком расчете получается некий диапазон, удовлетворяющий максимальной и минимальной величине отклонений нагрузки, что само по себе логично, но в результате каждого из таких расчетов могут получаться решения абсолютно «противоречащие» друг другу, поэтому возможен выход из диапазона оптимальных значений для рассматриваемого временного интервала в целом.

Механизм принятия оптимизационного решения в условиях неопределенности в работе [4] и учебнике коллектива авторов²⁷ основан на составлении платежной матрицы, отражающей изменение целевой функции от величины при различных значениях неопределенного параметра. В такой постановке можно получить результат, подходящий для рассмотренного сочетания режимов с определенной погрешностью, но не являющийся оптимальным ни для одного из них.

В случае, когда известен график нагрузки потребителей, можно использовать расчеты для каждой ступени такового.

В публикации [9] описана динамическая модель оптимального управления реактивной мощностью на промышленном предприятии, в которой минимизируются потери мощности на каждом из ступеней графика резкопеременной нагрузки с учетом характеристик устойчивости синхронных двигателей, которые участвуют в управлении потоками реактивной мощности. В данном методе наряду с традиционными вводятся ограничения по току возбуждения синхронных машин и по углам роторов. Результатом оптимизации является определение закона управления каждым синхронным двигателем. Алгоритм, представленный в [9], реализован в программе «ARENA». Предложенный способ подходит для оптимизации потоков реактивной мощности и предназначен для решения задачи КРМ на предприятии, где имеются синхронные машины, служащие для выработки

реактивной мощности, а график нагрузки потребителей является известным. Не все промышленные предприятия (ПП) имеют в наличии синхронные машины, а графики нагрузок достаточно нестабильные и непредсказуемые, поэтому применение такой методики не даст желаемого эффекта.

Авторы работы [14] задачу КРМ решают также для нескольких ступеней графика нагрузки с использованием генетического алгоритма. Целевой функцией здесь является суммарная стоимость покупки, установки и обслуживания компенсирующих устройств, при решении данной задачи накладывается стандартное ограничение (1.1) для всех узлов и добавляется ограничение по коэффициенту мощности (1.3 или $\cos\varphi$).

При определении мест установки и мощности КУ в качестве исходных нагрузок используется трехступенчатый график нагрузки, что не учитывает реального характера изменения нагрузки и изначально содержит методическую погрешность, которая может приводить к заведомо неоптимальным результатам. Применение такого подхода возможно только при проектировании, а не при эксплуатации. Его неэффективность доказана в [20], что подтверждается и сегодня. Введение дополнительного ограничения приводит только к усложнению поиска решения.

В [21] описан алгоритм КРМ, реализуемый в режиме реального времени и основанный на последовательном пересчете потерь мощности при различном размещении КУ в узлах сети при ее изменяющейся конфигурации, то есть на переборе вариантов, что увеличивает его трудоемкость. Такой подход может быть реализован только при наличии полной информации о потоках активной и реактивной мощностей в сети в режиме реального времени и возможности дистанционного управления как КУ, так и коммутационными аппаратами, позволяющими изменять ее конфигурацию. При этом оптимизация в [21] производится по одному текущему или ретроспективному параметру, то есть она основана на детерминированном подходе.



Использование в качестве метода оптимизации генетического алгоритма и его модификаций при решении оптимизационной задачи КРМ показано в работах как зарубежных [14, 22], так и отечественных авторов²⁶.

В диссертационной работе А.Н. Туликова²⁴ для решения оптимизационных задач по управлению потоками реактивной мощности на промышленном предприятии предложено использование нейронных сетей в сочетании с нечеткой логикой и генетическим алгоритмом. Но при этом используется лишь критерий максимального снижения потерь, а управление потоками реактивной мощности осуществляется по текущему распознанному состоянию (по данным АИИС КУЭ), что в условиях неопределенной информации в СЭС ПП не даст возможности получить действительно оптимальное управляющее воздействие.

Таким образом, все рассмотренные методы и методики КРМ используют в качестве целевой функции приведенные затраты, которые в зависимости от предложенного метода и области применения включают в себя различное сочетание таких параметров, как стоимость компенсирующих устройств, потери активной и реактивной мощности (или энергии) в сети, отклонения напряжений, пропускную способность элементов сети, штрафные надбавки за сверхнормативное потребление РМ, стоимость генерации реактивной мощности на электрических станциях и т.д. Использование приведенных затрат в качестве целевой функции абсолютно обосновано, и при разработке методики КРМ должны использоваться именно они, однако составляющие должны отвечать современным

условиям функционирования российской электроэнергетики.

Все авторы подтверждают многогранность воздействия КРМ на электрическую сеть, но при этом большинство из них показывают наиболее приемлемое решение по величине снижения потерь мощности и энергии.

Одни идут по пути упрощения оптимизационных расчетов, другие – по пути многоцелевой оптимизации, что встречает трудности при реализации таковых на реальных схемах электрических сетей.

Раскрытие неопределенности информации сводится к вариантному расчету серии характерных режимов с различными значениями неизвестных параметров, то есть к перебору вариантов, что не является решением проблемы.

Подходы, применяемые иностранными учеными [14, 21–27], основаны на использовании точной и полной информации о текущем состоянии сети и в принципе не рассматривают условия неопределенности.

Комплексное управление режимами СЭС по своей сути затруднительно, поскольку это связано с таким объектом управления, как СЭС предприятия, условия функционирования которого недостаточно изучены, а модель объекта и цель управления слабо формализованы. Применение искусственной нейронной сети для достижения достаточной скорости принятия решений управления, при этом схожесть эвристического алгоритма ИНС с мышлением человека (при достаточной эффективности обучения), дает нужное решение задачи в большинстве практически значимых случаев.

Характеристика устройств компенсации реактивной мощности

На современном этапе развития силовой энергетики разработано большое количество устройств, использующихся при регулировании уровней напряжений и потоков реактивной мощности, которые находят свое применение в сетях различных классов номинального напряжения различного

назначения [33–41 и др.]. Рассматривая всю гамму технических средств, использующихся для управления режимами реактивной мощности, необходимо выделить наиболее приемлемые и эффективные компенсирующие устройства.

Основную функцию по регулирова-



нию напряжения и управлению потоками реактивной мощности в распределительных сетях напряжением 35–110 кВ выполняют генераторы электрических станций и устройства РПН и ПБВ, установленные на подстанции (ПС), то есть централизованно решается балансовая задача КРМ и задача регулирования напряжения.

Крупные промышленные потребители, подключаемые к ПС РСК, как правило, самостоятельно проводят мероприятия по КРМ. Они используют синхронные двигатели (СД), участвующие в технологическом процессе [42], дополнительные конденсаторные установки, коммутируемые выключателями или включенными встречно-параллельно тиристорными вентилями, тиристорно-реакторные группы (ТРГ), преобразователи с естественной или искусственной коммутацией²⁸ [28, 33, 40, 41]. При наличии резко переменных нагрузок с набросами реактивной мощности в десятки и сотни Мвар применяются статические тиристорные компенсаторы (СТК), покрывающие такие пики²⁹ [40]. Кроме того, на промышленных предприятиях с электроприемниками, ухудшающими качество электрической энергии, применяются фильтрокомпенсирующие (ФКУ), симметрирующие и фильтросимметрирующие (ФСУ) устройства, снижающие уровень высших гармоник в сети и несимметрию напряжений и выполняющих КРМ.

Для сетей сверхвысоких классов напряжений рекомендуются СТК, СТАТКОМ, УШР, СК, асинхронизированные компенсаторы, управляемые УПК, а также устройства с комплексными функциями, управляющие как потоками мощности, так и параметрами сети – объединенные регуляторы потоков мощности [27, 43–46]. Они призваны управлять большими потоками мощности и, соответственно, имеют значительные единичные мощности и стоимости.

Их принято относить к активно-адаптивным элементам управления СЭС. Однако в приоритете для сетей сверхвысоких классов напряжений остаются устройства, ограничивающие уровни напряжений в узлах – ШР, УШР, УШРП, УШРТ и их различные варианты исполнения [27, 38, 43, 47], так как на первое место ставится надежность и безаварийность работы таких сетей.

В распределительных сетях 35–110 кВ основными источниками реактивной мощности являются конденсаторные установки. Они могут быть нерегулируемыми и регулируемыми.

Так как не каждое ПП имеет в наличии постоянно работающие СД и не может располагать генерирующими мощностями синхронных генераторов, то целесообразно рассматривать эффективность установки новых компенсирующих устройств.

Концепция управления Smart Grid подразумевает использование наиболее прогрессивных устройств, выполняющих как продольную, так и поперечную компенсацию реактивной мощности [51].

Подробное описание устройств, использующихся для управления потоками реактивной мощности, приведено в [5, 29–31, 33–35, 38, 40, 41, 43–46, 48–51 и др.]. На основании рассмотренных работ большого числа авторов сформирована табл. 2, в которой показано разделение типов устройств КРМ по уровням номинального напряжения сетей.

В России статические синхронные компенсаторы СТАТКОМ и СТК широко применяются для классов высокого и сверхвысокого напряжения, а их использование для классов среднего напряжения не наблюдается. Однако за рубежом уже существует положительная практика использования таких систем КРМ (например, [51]). Одно из таких устройств – высокоэкономичный статический регулируемый компен-

²⁸Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. Ю. Г. Барыбина и др. М.: Энергоатомиздат, 1990. 576 с. / Handbook on electrical energy supply design/ under edition of Yu.G. Barybin et al. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, 576 p.

²⁹Конюхова Е.А. Электроснабжение объектов: учеб. пособие для студ. учреждений сред. проф. образования. М.: Мастерство, 2002. 320 с. / Konyukhova E.A. Power supply of facilities: Learning aids for students of vocational educational institutions. Moscow: Masterstvo Publ., 2002, 320 p.



сатор SVC PLUS компании Siemens, который является усовершенствованной версией СТАТКОМ, позволяющий увеличить динамическую стабильность и качество электроэнергии в сетях различного напряжения (табл. 3).

SVC обеспечивает такие эксплуатационные преимущества, как минимальное техническое обслуживание, стабилизация сети и высокая динамичность за счет очень короткого времени срабатывания. Благодаря резервированию силовых модулей достигается очень высокая эксплуатационная готовность системы.

SVC PLUS обладает рядом преимуществ:

- повышение динамической стабильности систем передачи;
- повышение качества энергии, снижение риска падения напряжения и отключения электропитания;
- высокоэффективное снижение колебаний частоты в промышленности;
- низкая генерация гармоник и низкий уровень шума благодаря использованию технологии ММС (модульного многоуровневого конвертера);

Таблица 2

Рекомендуемые технические средства КРМ в зависимости от уровня напряжения сети в России

Table 2

Recommended technical means of reactive power compensation depending on the network voltage level in Russia

Уровень напряжения, кВ	Рекомендуемые типы оборудования	Источник
220 и выше	СТАТКОМ, СТК,	37, 39, 46
	УШР и БСК	34, 46, 47
	FACTS или ОРПМ	51, 53
	УПК и управляемые УПК	51
	СК	36
110	СТАТКОМ, СТК,	39, 46
	УШР + БСК или ИРМ	46
	БСК	39
0,4–35	СТК	35, 46, 57
	СКРМ (ФКУ и ТРГ)	39, 45, 46
	СД	8, 35, 38, 55, 58
	БК, КУ	35, 38–41, 48
	УКТИН	56

Таблица 3

Рекомендуемые типы SVC PLUS

Table 3

Recommended types of SVC PLUS

Реактивная мощность, Мвар	Уровень напряжения, кВ				
	8	11	14	36	110 и выше
25	S	M	L	C	S, M, L, C
35					
50					
100					
200		4×L	2×C	4×L, 2×C	
400					
					4×C



- минимальный объем работ по проектированию благодаря стандартизированной компонентной конструкции;

- быстрое, эффективное модульное и экономически выгодное решение.

- SVC PLUS может быть адаптирован к индивидуальным характеристикам реактивной мощности: четыре стандартные конфигурации – SVC PLUS S (+/-25 Мвар), SVC PLUS M (+/-35 Мвар), SVC PLUS L (+/-50 Мвар) и SVC PLUS C (+/-100 Мвар) – поставляются как решения контейнерного типа. До четырех таких блоков могут быть объединены в одну систему и работать в полностью параллельном режиме. Решения без трансформаторов возможны до 36 кВ. Для более высоких напряжений си-

стемы используются стандартные трансформаторы переменного тока. Эта уникальная модульная конструкция делает SVC PLUS высокоадаптивным решением с прекрасными рабочими характеристиками и высокой экономической эффективностью.

Таким образом, модульная конструкция SVC PLUS становится высокоадаптивным решением с необходимыми рабочими характеристиками и высокой экономической эффективностью для управления КРМ на стороне 10 кВ, что в совокупности с управлением РПН трансформаторов на главной понизительной подстанции позволит автоматизировать управление потоками реактивной мощности в системах электроснабжения предприятия.

Обоснование автоматизации управления потоками реактивной мощности

Управление режимами функционирования СЭС делится на автоматическое и оперативное. Для них характерны ограничения, влияющие на качество управления режимами СЭС. Это такие, как недостаточная информационная обеспеченность, несовершенство методов обработки информации и принятия решений, ограниченное время для формирования управляющих воздействий, снять которые позволяют современные математические методы и средства вычислительной техники [52–54], а также применение микропроцессоров и систем управления на их основе. В практике управления режимами СЭС возможен качественно новый подход к принятию решения – от формирования оптимальных управляющих воздействий, соответствующих характеру возмущения в темпе процесса, до адаптации системы управления к текущему режиму.

Решению этих задач способствует объектно-функциональная интеграция систем управления на единой технической, информационной и модельно-программной основе [55], которая включает взаимодействие ряда систем, таких как автоматизированная система диспетчерского управления (АСДУ), автоматизированная система управления технологическими процессами

(АСУ ТП) объектов, автоматизированная система коммерческого и технического учета электроэнергии (АСКУЭ и АСТУЭ), система защиты, управления и контроля, средства управления в нормальных и аварийных режимах и т.д. В итоге формируется информационная сеть с интеллектуальными узлами, где происходит обработка информации и принятие локальных решений. Основу информационной сети в задачах оперативного управления режимами СЭС в реальном времени составляют телеметрические измерения перетоков мощности, уровней напряжения в узлах и теле сигналы о состоянии основного оборудования СЭС. Именно цикл их обновления определяет темп обработки информации²⁴.

В связи с этим одним из эффективных путей экономии электроэнергии является внедрение на промышленных предприятиях современных АСКУЭ. Но такие системы, уже установленные на промпредприятиях, работают далеко не на пределе своих технических и информационных возможностей [56]. В основном идет сбор информации о свершившихся событиях в СЭС и отсутствует какое-либо управление. Для того чтобы АСКУЭ играла активную роль в процессе электроснабжения, алгоритм ее работы, кроме сбора информации,



должен либо включать управляющие воздействия на этот процесс для потребителя, либо информировать потребителя и поставщика электроэнергии о принятом решении с указанием причин [57]. Такая реализация активной АСКУЭ является интегральным вариантом, при котором технологический комплекс решает технико-экономические задачи и выполняет функции АСУ ТП.

Таким образом, АСКУЭ используется как инструмент управления электропотреблением, обладающий характерными для применения исключительно в области управления режимами СЭС свойствами [56, 58–60]:

1) идентификационные свойства – однозначное определение режимов и параметров режимов работы объекта и элементов системы в любой момент времени. Другими словами – это наглядное представление картины электропотребления каждого подразделения предприятия и мгновенных значений параметров режима в контрольных точках, максимально приближенных к реальному времени (желательно с большой частотой снятия показаний со счетчиков, т.е. как 30-минутных максимумов нагрузки, так и на меньших интервалах времени);

2) управляющие свойства – принятие решений и формирование управляющих воздействий на элементы системы в различных режимах по заданным алгоритмам при сочетании централизованного и

местного управления исполнительными устройствами электроустановок (трансформаторов с РПН в центре питания, компенсирующих устройств) и наличии избирательности.

Элементами АСКУЭ являются различные микропроцессорные средства с достаточно большим объемом функций. Например, у счетчиков ЕвроАльфа имеются следующие основные возможности, которые можно использовать при управлении режимами СЭС³⁰.

а) измерение активной и реактивной энергии и мощности в двух направлениях;

б) измерение (вычисление) и отображение напряжения и тока пофазно, частоты сети, коэффициента мощности, фазных углов тока и напряжения.

В итоге АСКУЭ работает как человеко-машинная система, сочетающая использование эффективных современных средств вычислительной техники с деятельностью инженера, роль которого заключается в принятии окончательного решения по заданию энергоэффективного режима работы СЭС предприятия в масштабе реального времени.

В связи с проблемами по извлечению информации о режимах СЭС предприятий выявлена возможность использования АСКУЭ лишь в качестве информационной базы для управления режимами СЭС, но не более того. Поэтому в дальнейшем этот вопрос будет затрагиваться только с этой позиции³¹.

Заключение

1. Согласно нормативно-правовым документам, потребитель обязан:

– обеспечить функционирование средств регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности, установ-

ленных в границах его балансовой принадлежности, для поддержания значений показателей качества электрической энергии, обусловленные работой его энергопринимающих устройств;

³⁰Руководство по эксплуатации. ДЯИМ.411152.003-11ПЭ. Многофункциональный микропроцессорный счетчик электрической энергии типа ЕвроАЛЬФА / Operator's manual. ДЯИМ.411152.003-11ПЭ. Multifunctional microprocessor-based electric energy meter of Euroalfa type.

³¹Сизганов Н.В. Управление потоками реактивной мощности в системе электроснабжения с активно-адаптивными элементами: магистерская диссертация. Красноярск, 2016. 91 с. / Sizganov N.V. Control of reactive power flows in the power supply system with active-adaptive elements: Master's degree thesis. Krasnoyarsk, 2016. 91 p.



– соблюдать значения соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств);

– использовать приборы, позволяющие учитывать реактивную мощность и измеряющие почасовые объемы потребления (производства) реактивной мощности;

– поддерживать в надлежащем техническом состоянии принадлежащие ему устройства, обеспечивающие регулирование реактивной мощности, а также иные устройства, необходимые для поддержания требуемых параметров надежности и качества электрической энергии.

Поставщик электроэнергии вправе ограничить потребителя за невыполнение всего вышесказанного.

2. Управление потоками реактивной мощности (УПРМ) возможно путем компенсации реактивной мощности. Решению задачи КРМ посвящены работы многих ученых, в трудах которых:

– раскрыты подходы, основанные как на детерминированном задании исходной информации, так и на вероятностном;

– проблема КРМ обозначена как многокритериальная, которую можно решить, оптимизируя целевую функцию либо по одному, либо по нескольким параметрам.

В работах последних лет при частных решениях задачи КРМ активно применяются эволюционные методы: генетические алгоритмы и искусственные нейронные сети, теория нечетких множеств и нечеткая логика в совокупности с ситуационным управлением.

3. Стремление в перспективе перейти к активно-адаптивному управлению тре-

бует повышения качества управления потоками РМ и, как следствие, определяет необходимость поиска новых принципов и подходов к их управлению.

4. Как правило, УПРМ осуществляется в распределительных сетях. Есть работы, посвященные СЭС, но их мало, в них не применялись активно-адаптивные элементы, и управления как такого не было.

5. Исходя из зарубежного опыта, установка СТАТКОМ на среднее напряжение промпредприятий без затрат на дополнительные трансформаторы в комплектации СТАТКОМ становится высокоадаптивным решением для установки УКРМ на стороне 10 кВ с необходимыми рабочими характеристиками и высокой экономической эффективностью. Это в совокупности с управлением РПН трансформаторов на ГПП позволит автоматизировать управление потоками реактивной мощности в СЭС предприятия.

6. Для успешной автоматизации УПРМ СЭС ПП АСКУЭ должна работать не только человеко-машинная система, сочетающая использование эффективных современных средств вычислительной техники с деятельностью человека-инженера, роль которого заключается в принятии окончательного решения по заданию экономического режима работы СЭС предприятия в масштабе реального времени как в ручном, так и в диалоговом режимах. Для достижения достаточной быстроты принятия решений управления необходимо применение искусственной нейронной сети. При этом схожесть эвристического алгоритма ИНС с мышлением человека (при достаточной эффективности обучения) дает нужное решение задачи УПРМ в большинстве практически значимых случаев.

Библиографический список

1. Кудрин Б.И. История компенсации реактивной мощности: комментарий главного редактора // Электрика. 2001. № 6. С. 26–29.
2. Железко Ю.С. Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения сетевых организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности // Электрические станции. 2008. № 5. С. 27–31.

3. Экономические стимулы коррекции коэффициента мощности в России [Электронный ресурс] // Elec.ru. Электротехнический интернет-портал. URL: <https://www.elec.ru/articles/ekonomicheskie-stimuly-korrekcii-koefficienta-mosh/> (25.04.2018).
4. Арион В.Д., Каратун В.С., Пасинковский П.А. Компенсация реактивной мощности в условиях неопределенности исходной информации // Электричество.



1991. № 2. С. 6–11.

5. Красник В.В. Автоматические устройства по компенсации реактивной мощности в электросетях предприятий. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983. 136 с.

6. Железко Ю.С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1981. 200 с.

7. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электрической энергии: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.

8. Колибаба В.И., Жабин К.В. Особенности формирования и развития рынка реактивной мощности // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Экономические науки. 2017. Т. 10, № 4. С. 114–125. DOI: 10.18721/JE.10411.

9. Игуменцев В.А., Саламатов И.А., Коваленко Ю.П. Метод оптимального управления реактивной мощностью в системах электроснабжения // Электричество. 1987. № 1. С. 16–21.

10. Карпов Ф.Ф. Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях. М.: Энергия, 1975. 184 с.

11. Ковалёв И.Н. Выбор компенсирующих устройств при проектировании электрических сетей. М.: Энергоатомиздат, 1990. 200 с.

12. Мельников Н.А. Реактивная мощность в электрических сетях. М.: Энергия, 1975. 128 с.

13. Поспелов Г.Е., Сыч Н.М., Федин В.Т. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах. М.: Энергоатомиздат, 1983. 112 с.

14. Ellithy K., Al-Hinai A., Moosa A. Optimal shunt capacitors allocation in distribution networks using genetic algorithm – practical case study // International Journal of Innovations in Energy Systems and Power. 2008. Vol. 3. No. 1.

15. Гамм А.З., Голуб И.И. Адресность передачи активных и реактивных мощностей в электроэнергетической системе // Электричество. 2003. № 3. С. 9–16.

16. Колесников С.А. Алгоритм расчета оптимального размещения компенсирующих устройств в сложных энергосистемах // Электрические сети и системы. 1967. Вып. 3.

17. Железко Ю.С., Артемьев А.В., Савченко О.В. Расчет, анализ и нормирование потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2004. 280 с.

18. Борисов Р.И., Песиголовец Л.Ф. Размещение источников реактивной мощности на основе многоцелевой оптимизации // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. 1986. № 4. С. 155–159.

19. Арзамасцев Д.А., Скларов Ю.С. Выбор мощности и размещения компенсирующих устройств в электрической сети. Материалы II Республиканской научно-технической конференции по применению вычислительной техники. Минск: Изд-во БПИ. 1968. С. 20–24.

20. Тарабин И.В., Скоков Р.Б., Терехин И.А., Горба-

чев С.А. Компенсация реактивной мощности как метод повышения качества электрической энергии и сокращения потерь на примере данных «МРСК СИ-БИРИ» // Фундаментальные исследования. 2015. № 2 (ч. 22). С. 4876–4879.

21. Araujo W.J., Ekel P.Ya., Filho R.P.F., Kokshenev I.V., Schuffner H.S. Multicriteria decision making for reactive power compensation in distribution systems [Электронный ресурс] // Proceedings of the European Computing Conference (ECC '11). Paris, France, April 28–30, 2011. P. 56–62. URL: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Paris/ECC/ECC-07.pdf> (25.04.2018).

22. Liu Yutian, Shi Jiachuan, Qian Xia. Reactive power compensation and voltage control in jinan power distribution system [Электронный ресурс] // 18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, 6–9 June 2005. URL: http://www.cired.be/CIRED05/papers/cired2005_0057.pdf (25.04.2018).

23. Araujo W.J., Ekel P.Ya., Filho R.P.F., Kokshenev I.V., Schuffner H.S. Monocriteria and multicriteria based placement of reactive power sources in distribution systems // International journal of applied mathematics and informatics. 2011. Vol. 5. No. 3. P. 240–248.

24. Jerome J. Efficient reactive power compensation algorithm for distribution network // ATSTD. 2003. Vol. 20. P. 373–383.

25. Pourshafie A., Mortazavi S.S., Saniei M., Saidian A. Optimal compensation of reactive power in the restructured distribution network // World Academy of Science, Engineering and Technology. 2009. No. 54. P. 119–122.

26. Raap M., Raesaar P., Tiigimägi E. Reactive power pricing in distribution networks // Oil Shale. 2011. Vol. 28. P. 223–239.

27. Tenti P., Mattavelli P., Tedeschi E. Compensation techniques based on reactive power conservation // Electrical power quality and utilization. 2007. Vol. 8. No. 1. P. 17–24.

28. Брянецев М.А., Базылев Б.И., Дягилева С.В., Карымов Р.Р., Негрышев А.А. Автоматические системы компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения электрической сети на базе УШР и БСК // Электроэнергетика: сегодня и завтра. 2010. № 3. С. 47–50.

29. Manusov V.Z., Bumtsend U., Tretyakova E.S. Optimization Compensating Devices in the Power supply Systems Using Population Algorithms // 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016) (Novosibirsk, 01–03 июня 2016 г.). Novosibirsk, 2016. P. 276–280.

30. Веников В.А., Жуков Л.А., Карташев И.И., Рыжов Ю.П. Статические источники реактивной мощности в электрических сетях. М.: Энергия, 1975. 136 с.

31. Тухватуллин М.М., Ивекеев В.С., Ложкин И.А., Урманова Ф.Ф. Анализ современных устройств FACTS, используемых для повышения эффективности функционирования электроэнергетических систем России // Электротехнические системы и ком-



- поненты. 2015. № 3 (28). С. 41–46.
32. Готман В.И., Маркман Г.З., Маркман П.Г. Задачи обследования системы компенсации реактивной мощности // Промышленная энергетика. 2006. № 8. С. 50–55.
33. Дьяков А.Ф., Никонец Л.А. Статические компенсаторы реактивной мощности прямого регулирования и их режимы М.: Изд-во МЭИ, 1991. 172 с.
34. Ли В.Н., Шурова Н.К. Особенности выбора компенсирующих устройств в тяговой сети по критериям оптимальности // Известия Транссиба. 2016. № 3 (27). С. 38–44.
35. Ильяшов В.П. Конденсаторные установки промышленных предприятий. 2-е изд., переработ. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983. 152 с.
36. Каневский Я.М. Компенсация реактивной мощности на подстанциях насосных тепловых сетей // Промышленная энергетика. 1991. № 7. С. 39.
37. Корнилов Г.П., Николаев А.А., Пястолова Д.Ю. Технико-экономическое сравнение компенсирующих устройств для дуговых сталеплавильных печей широкого класса мощности // Электротехнические системы и компоненты. 2016. № 1 (30). С. 34–38.
38. Кондратенко Д.В., Шиваева Т.А., Виштинбеков А.В. Статический компенсатор реактивной мощности на базе УШР как необходимое средство повышения энергоэффективности в электроэнергетике // Электро. 2010. № 2. С. 43–48.
39. Корнилов Г.П., Шеметов А.Н., Храмшин Т.Р., Журавлёв Ю.П., Семёнов Е.А. Управление реактивной мощностью в системах электроснабжения с мощными тиристорными преобразователями прокатных станов // Промышленная энергетика. 2008. № 1. С. 39–44.
40. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. М.: ЭНАС, 2002. 248 с.
41. Кочкин В.И. Новые технологии повышенияпускной способности ЛЭП. Управляемая передача мощности // Новости электротехники. 2007. № 4 (46). С. 2–5.
42. Шаров Ю.В., Пелымский В.Л., Гаджиев М.Г. Снижение потерь электроэнергии при внедрении Smart Grid // Электроэнергия: передача и распределение. 2011. № 6 (9). С. 60–64.
43. Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. М.: Издательский дом МЭИ, 2012. 336 с.
44. Вариводов В.Н., Мордкович А.Ш., Остапенко Е.И., Панибратец А.Н., Цфасман Г.М., Чемерис В.С., Шульга Р.Н. Основные направления создания комплекса оборудования для интеллектуальных электрических сетей [Электронный ресурс] // Электротехнический рынок (рекламно-информационный журнал). 2011. № 4 (40). URL: <https://market.elec.ru/nomer/37/osnovnye-napravleniya-sozdaniya-kompleksa-oborudov/> (25.04.2018).
45. Черепанов В.В., Басманов В.Г. О необходимости создания регуляторов реактивной мощности с использованием прогнозирования // Известия вузов. Проблемы энергетика. 2006. № 11-12. С. 38–40.
46. Чистяков Г.Н., Беляев Р.Ю. Применение методов нечеткой логики при оптимизации реактивных нагрузок систем электроснабжения // Электрика. 2006. № 12. С. 20–24.
47. Большаков О.В., Воронин В.В., Пелымский В.В., Шамонов Р.Г., Тульский В.Н., Толстов М.М. Управление качеством электроэнергии в ЕНЭС // Электроэнергия. Передача и распределение. 2012. № 1 (10). С. 96–101.
48. Кронгауз Д.Э. Повышение качества электроэнергии в городских распределительных сетях посредством управления режимами реактивной мощности // Промышленная энергетика. 2010. № 10. С. 39–43.
49. Маслов А.А., Нечаев О.П., Польский М.О., Федотов А.И. Статические компенсирующие устройства для промышленных предприятий // Электрические станции. 2000. № 3. С. 47–52.
50. Попов Ю.П., Дмитриев Ю.А., Кирилина О.И. Управление компенсацией реактивной мощности в узлах промышленной нагрузки // Электрика. 2006. № 12. С. 15–20.
51. Siemens AG. FACTS – Flexible AC Transmission Systems. URL: <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/facts/> (25.04.2018).
52. V.R. Pandi, A. Al-Hinai, A. Feliachi Adaptive coordinated feeder flow control in distribution system with the support of distributed energy resources IJEPES, 85 (2017), 10.1016/j.ijepes.2016.09.004
53. Qianggang Wang, Jianquan Liao, Yu Su, Chao Lei, Tao Wang, Niancheng Zhou. An optimal reactive power control method for distribution network with soft normally-open points and controlled air-conditioning loads // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. December 2018. Vol. 103. P. 421–430.
54. Soni J., Sen B., Kanakesh V.K., Panda S.K. Performance analysis and evaluation of reactive power compensating electric spring with linear loads(Article) // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. October 2018. Vol. 101. P. 116–126.
55. Тарасов В.Б. От искусственного интеллекта к искусственной жизни: новые направления в науках об искусственном // Новости искусственного интеллекта. 1995. № 4. С. 93–117.
56. Сапронов А.А. К вопросу о создании эффективного механизма контроля и учета энергопотребления в сетях 0,4 кВ // Промышленная энергетика. 2004. № 1. С. 22–28.
57. Пантелеев В.И., Туликов А.Н. Основы нечеткого управления режимами систем электроснабжения предприятий с помощью АСКУЭ // XII Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Современные техника и технологии» (Томск, 27–31 марта 2006 г.). В 2 т. Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2006. Т. 2. С. 180–182.
58. Абакумов Ю.М., Мартынов А.А., Саламатов О.В.,



Орехов П.Ф., Бородин В.А., Коновалов Н.А., Матиго-
ров В.А. Опыт проектирования и внедрения АСКУЭ
промышленного предприятия на базе КТС «Энер-
гия» // Промышленная энергетика. 2002. № 6.
С. 28–33.

59. Алексейчик В.В., Болгов В.Т. Проблемы учета,
контроля и управления энергопотреблением на
промышленном предприятии и пути их решения //

Промышленная энергетика. 2002. № 3. С. 6–14.

60. Ваджилов Ф.Р., Шмыров В.А., Яковлев А.А.,
Надеина М.С. Автоматизированная система кон-
троля, учета и управления электропотреблением на
базе КТС «Энергия» в АО «Архангельский морской
торговый порт» // Промышленная энергетика. 2003.
№ 1. С. 6–11.

References

1. Kudrin B.I. History of reactive power compensation:
editor-in-chief's commentary. *Elektrika*. [Electrical engi-
neering]. 2001, no. 6, pp. 26–29. (In Russian).

2. Zhelezko Yu.S. New regulatory documents determin-
ing the relationships between network organizations
and electrical energy buyers in terms of reactive power
consumption conditions. *Elektricheskie stantsii*. [Electri-
cal Stations]. 2008, no. 5, pp. 27–31. (In Russian).

3. *Ekonomicheskie stimuly korrektsii koeffitsienta
moshchnosti v Rossii* [Economic incentives for power
factor correction in Russia]. Elec.ru. Elektrotekhnich-
eskii internet-portal. Available at:
[https://www.elec.ru/articles/ekonomicheskie-stimuly-](https://www.elec.ru/articles/ekonomicheskie-stimuly-korrektsii-koeffitsienta-mosh/)
[korrektsii-koeffitsienta-mosh/](https://www.elec.ru/articles/ekonomicheskie-stimuly-korrektsii-koeffitsienta-mosh/) (accessed 25 April 2018).

4. Arion V.D., Karatun V.S., Pasinkovskij P.A. Reactive
power compensation in conditions of initial information
uncertainty. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1991, no. 2,
pp. 6–11. (In Russian).

5. Krasnik V.V. *Avtomaticheskie ustroystva po kompen-*
sacii reaktivnoi moshchnosti v elektrosetyakh predpri-
yatii [Automatic devices for reactive power compensa-
tion in enterprise electrical networks]. Moscow: Ener-
goatomizdat Publ., 1983, 136 p. (In Russian).

6. Zhelezko Yu.S. *Kompensatsiya reaktivnoi
moshchnosti v slozhnykh elektricheskikh sistemakh*
[Reactive power compensation in complex electrical
systems]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1981,
200 p. (In Russian).

7. Zhelezko Yu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaya
moshchnost'. Kachestvo elektricheskoi energii:
rukovodstvo dlya prakticheskikh raschetov* [Electrical
energy losses. Reactive power. Quality of electrical
energy: a guide for practical calculations]. Moscow:
ENAS Publ., 2009, 456 p. (In Russian).

8. Kolibaba V.I., Zhabin K.V. Features of formation and
development of the reactive power market. *Nauchno-*
*tekhnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie
nauki* [St. Petersburg Polytechnic University Journal of
Engineering Science and Technology. Economic sci-
ences]. 2017, vol. 10, no. 4, pp. 114–125.
<https://doi.org/10.18721/JE.10411>. (In Russian).

9. Igumenshchev V.A., Salamatov I.A., Kovalenko Yu.P.
The method of optimal control of reactive power in
power supply systems. *Elektrichestvo* [Electricity]. 1987,
no. 1, pp. 16–21. (In Russian).

10. Karpov F.F. *Kompensatsiya reaktivnoi moshchnosti
v raspredelitel'nykh setyakh*. Reactive power compen-
sation in distribution networks. Moscow: Energia, 1975.
184 p.

11. Kovalyov I.N. *Vybor kompensiruyushchikh ustroystv
pri proektirovanii elektricheskikh setei* [Selection of
compensating devices in electrical network design].
Moscow: Energoatomizdat Publ., 1990, 200 p. (In Rus-
sian).

12. Mel'nikov N.A. *Reaktivnaya moshchnost' v el-
ektricheskikh setyakh* [Reactive power in electrical net-
works]. Moscow: Energiya Publ., 1975, 128 p. (In Rus-
sian).

13. Pospelov G.E., Sych N.M., Fedin V.T. *Kompensiruyushchie i reguliruyushchie ustroystva v
elektricheskikh sistemakh* [Compensating and regulat-
ing devices in electrical systems]. Moscow: Ener-
goatomizdat Publ., 1983, 112 p. (In Russian).

14. Ellithy K., Al-Hinai A., Moosa A. Optimal shunt ca-
pacitors allocation in distribution networks using genetic
algorithm – practical case study. *International Journal of
Innovations in Energy Systems and Power*. 2008,
vol. 3, no. 1.

15. Gamm A.3., Golub I.I. Target transfer of active and
reactive power in the electric power system. *Elektrich-
estvo* [Electricity]. 2003, no. 3, pp. 9–16. (In Russian).

16. Kolesnikov S.A. Calculation algorithm of optimal
arrangement of compensating devices in complex pow-
er systems. *Elektricheskie seti i sistemy* [Electrical net-
works and systems]. 1967, issue. 3. (In Russian).

17. Zhelezko Yu.S., Artem'ev A.V., Savchenko O.V. *Raschet, analiz i normirovanie poter' elektroenergii v
elektricheskikh setyakh: rukovodstvo dlya praktich-
eskikh raschetov* [Calculation, analysis and normaliza-
tion of electric power losses in electric networks: a
guide for practical calculations]. Moscow: ENAS Publ.,
2004, 280 p. (In Russian).

18. Borisov R.I., Pesigolovec L.F. Location of reactive
power sources on the basis of multipurpose optimiza-
tion. *Izvestiya AN SSSR. Energetika i transport* [Izvesti-
ya AN SSSR. Energy and transport]. 1986, no. 4,
pp. 155–159. (In Russian).

19. Arzamashev D.A., Sklyarov Yu.S. *Vybor
moshchnosti i razmeshcheniya kompensiruyushchikh
ustroystv v elektricheskoi seti* [Selection of power and
location of compensating devices in the electrical net-
work]. *Materialy II Respublikanskoi nauchno-*
*tekhnicheskoi konferentsii po primeneniyu vychislitel'noi
tekhniki* [Materials of II Republican scientific and tech-
nical conference on computer technology application].
Minsk: BPI Publ., 1968, pp. 20–24. (In Russian).

20. Tarabin I.V., Skokov R.B., Terekhin I.A., Gorbachev
S.A. Compensation of jet power as method of improve-



ment of quality of electric energy and reduction of losses on the example of data of «IDGC OF SIBERIA». *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research]. 2015, no. 2 (part 22), pp. 4876–4879. (In Russian).

21. Araujo W.J., Ekel P.Ya., Filho R.P.F., Kokshenev I.V., Schuffner H.S. Multicriteria decision making for reactive power compensation in distribution systems. Proceedings of the European Computing Conference (ECC '11). Paris, France, April 28–30, 2011. P. 56–62.

Available at: <http://www.wseas.us/e-library/conferences/2011/Paris/ECC/ECC-07.pdf> (accessed 25 April 2018).

22. Liu Yutian, Shi Jiachuan, Qian Xia. Reactive power compensation and voltage control in jinan power distribution system. 18th International Conference on Electricity Distribution. Turin, 6–9 June 2005. Available at: http://www.cired.be/CIRED05/papers/cired2005_0057.pdf (accessed 25 April 2018).

23. Araujo W.J., Ekel P.Ya., Filho R.P.F., Kokshenev I.V., Schuffner H.S. Monocriteria and multicriteria based placement of reactive power sources in distribution systems. *International journal of applied mathematics and informatics*. 2011, vol. 5, no. 3, pp. 240–248.

24. Jerome J. Efficient reactive power compensation algorithm for distribution network. *ATSTD*. 2003, vol. 20, pp. 373–383.

25. Pourshafie A., Mortazavi S.S., Saniei M., Saidian A. Optimal compensation of reactive and power in the restructured distribution network. *World Academy of Science, Engineering Technology*. 2009, no. 54, pp. 119–122.

26. Raap M., Raesaar P., Tiigimägi E. Reactive power pricing in distribution networks. *Oil Shale*. 2011, vol. 28, pp. 223–239.

27. Tenti P., Mattavelli P., Tedeschi E. Compensation techniques based on reactive power conservation. *Electrical power quality and utilization*. 2007, vol. 8, no. 1, pp. 17–24.

28. Bryancev M.A., Bazylev B.I., Dyagileva S.V., Karymov R.R., Negryshev A.A. Automatic systems for reactive power compensation and electrical network voltage stabilization on the basis of USM and BSK. *Elektroenergetika: segodnya i zavtra* [Power generation: today and tomorrow]. 2010, no. 3, pp. 47–50. (In Russian).

29. Manusov V.Z., Bumtsend U., Tretyakova E.S. Optimization Compensating Devices in the Power supply Systems Using Population Algorithms. 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST-2016). Novosibirsk, 2016, pp. 276–280.

30. Venikov V.A., Zhukov L.A., Kartashev I.I., Ryzhov Yu.P. *Sticheskie istochniki reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setyakh* [Static sources of reactive power in electrical networks]. Moscow: Energiya Publ., 1975, 136 p. (In Russian).

31. Tuhvatullin M.M., Ivekeev V.S., Lozhkin I.A., Urmanova F.F. Analysis of the modern FACTS devices used for increasing the functioning efficiency of Russian electric power systems. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komponenty* [Electrotechnical systems and compo-

nents]. 2015, no. 3 (28), pp. 41–46. (In Russian).

32. Gotman V.I., Markman G.Z., Markman P.G. Problems of the reactive power compensation system examination. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2006. No. 8. P. 50–55. (In Russian).

33. D'yakov A.F., Nikonec L.A. *Sticheskie kompensatory reaktivnoi moshchnosti pryamogo regulirovaniya i ih rezhimy* [Static compensators of reactive power of direct regulation and their modes]. Moscow: MEI Publ., 1991, 172 p. (In Russian).

34. Li V.N., Shurova N.K. Features of compensating devices choice in traction power supply system with using optimally criterion. *Izvestiya Transsiba* [Journal of Transsib Railway Studies]. 2016, no. 3 (27), pp. 38–44. (In Russian).

35. Il'yashov V.P. *Kondensatornye ustanovki promyshlennykh predpriyatii* [Condenser installations of industrial enterprises]. Moscow: Energoatomizdat, 1983, 152 p. (In Russian).

36. Kanevskii Ya.M. Reactive power compensation at pumping heat network substations. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 1991, no. 7, pp. 39. (In Russian).

37. Kornilov G.P., Nikolaev A.A., Pyastolova D.Yu. Technical and economic comparison of compensating devices for arc furnaces in broad class of power. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komponenty* [Electrotechnical Systems and Complexes]. 2016, no. 1 (30), pp. 34–38. (In Russian).

38. Kondratenko D.V., Shivaeva T.A., Vishtibeev A.V. Static reactive power compensator on the base of CSR as a requisite measure to enhance energy efficiency in electric power industry. *Elektro* [Elektro]. 2010, no. 2, pp. 43–48. (In Russian).

39. Kornilov G.P., Shemetov A.N., Hramshin T.R., Zhuravlyov Yu.P., Semyonov E.A. Control of reactive power in systems of electric power supply with powerful thyristor converters of rolling mills. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2008, no. 1, pp. 39–44. (In Russian).

40. Kochkin V.I., Nechaev O.P. *Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setyakh energosistem i predpriyatii* [Application of static compensators of reactive power in electrical networks of power systems and enterprises]. Moscow: ENAS Publ., 2002, 248 p. (In Russian).

41. Kochkin V.I. New technologies to increase the power line transmission capacity. Controlled power transmission. *Novosti elektrotekhniki* [Electrical Engineering News]. 2007. No. 4 (46), pp. 2–5. (In Russian).

42. Sharov Yu.V., Pelymskij V.L., Gadzhiev M.G. Reduction of electrical energy losses at Smart Grid introduction. *Elektroenergiya: peredacha i raspredelenie* [Electric Power. Transmission and Distribution]. 2011, no. 6 (9), pp. 60–64. (In Russian).

43. Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. *Upravlenie potokami elektroenergii i povyshenie effektivnosti elektroenergeticheskikh sistem* [Control of electrical energy flow and improvement of power grid efficiency]. Moscow: MEI Publishing House., 2012, 336 p.



(In Russian).

44. Varivodov V.N., Mordkovich A.Sh., Ostapenko E.I., Panibratov A.N., Cfasman G.M., Chemeris V.S., Shul'ga R.N. The basic directions of equipment complex creation for intelligent electric networks. *Elektrotehnicheskij rynek (reklamno-informacionnyj zhurnal)* [Electrotechnical Market (information-advertising magazine)]. 2011, no. 4 (40). Available at: <https://market.elec.ru/nomer/37/osnovnye-napravleniya-sozdaniya-kompleksa-oborudov/> (accessed 25 April 2018).

45. Cherepanov V.V., Basmanov V.G. On the need to create reactive power regulators using forecasting. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Proceedings of the Higher Educational Institutions. Energy Sector Problems]. 2006, no. 11-12, pp. 38–40. (In Russian).

46. Chistyakov G.N., Belyaev R.Yu. Application of fuzzy logic methods in the optimization of power supply system reactive loads. *Elektrika* [Electrical Engineering]. 2006, no. 12, pp. 20–24. (In Russian).

47. Bol'shakov O.V., Voronin V.V., Pelymskii V.V., Shamonov R.G., Tul'skii V.N., Tolstov M.M. Electrical energy quality management in UNEG. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie* [Electric Power. Transmission and Distribution]. 2012, no. 1 (10), pp. 96–101. (In Russian).

48. Krongauz D.E. Improving electrical energy quality in urban distribution networks by controlling reactive power regimes. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2010, no. 10, pp. 39–43. (In Russian).

49. Maslov A.A., Nechaev O.P., Pol'skij M.O., Fedotov A.I. Static compensating devices for industrial enterprises. *Elektricheskie stantsii* [Electrical Stations]. 2000, no. 3, pp. 47–52. (In Russian).

50. Popov Yu.P., Dmitriev Yu.A., Kirilina O.I. Control of reactive power compensation in industrial load nodes. *Elektrika* [Electrical Engineering]. 2006, no. 12, pp. 15–20. (In Russian).

51. Siemens AG. FACTS – Flexible AC Transmission Systems. URL:

<http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/facts/> (accessed 25 April 2018).

52. V.R. Pandi, A. Al-Hinai, A. Feliachi Adaptive coordinated feeder flow control in distribution system with the support of distributed energy resources IJEPES, 85 (2017), 10.1016/j.ijepes.2016.09.004

53. Qianggang Wang, Jianquan Liao, Yu Su, Chao Lei,

Tao Wang, Niancheng Zhou. An optimal reactive power control method for distribution network with soft normally-open points and controlled air-conditioning loads. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. December 2018, vVol. 103, pp. 421–430.

54. Soni J., Sen B., Kanakesh V.K., Panda S.K. Performance analysis and evaluation of reactive power compensating electric spring with linear loads (Article). *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*. October 2018, vol. 101, pp. 116–126.

55. Tarasov V.B. From Artificial Intelligence to Artificial Life: New Directions in the Artificial Sciences. *Novosti iskusstvennogo intellekta* [News of Artificial Intelligence]. 1995, no. 4, pp. 93–117. (In Russian).

56. Saprionov A.A. To the creation of an effective mechanism for monitoring and accounting of energy consumption in 0.4 kV networks. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2004, no. 1, pp. 22–28. (In Russian).

57. Panteleev V.I., Tulikov A.N. *Osnovy nechetkogo upravleniya rezhimami sistem elektrosnabzheniya predpriyatii s pomoshch'yu ASKUE* [Fundamentals of fuzzy control of enterprise power supply system modes with the help of ASKUE]. XII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya studentov, aspirantov i molodykh uchenykh “Sovremennye tekhnika i tekhnologii” [XII International scientific and practical conference of students, postgraduates and young scientists “Modern engineering and technologies”]. In 2 volumes. Tomsk: Tomsk polytechnical university Publ., 2006, vol. 2, pp. 180–182. (In Russian).

58. Abakumov Yu.M., Martynov A.A., Salamatov O.V., Orekhov P.F., Borodin V.A., Konovalov N.A., Matigorov V.A. Experience in the design and introduction of AM-RMS of an industrial enterprise on the basis of CTS “Energia”. *Promyshlennaya energetika*. [Industrial Power Engineering]. 2002, no. 6, pp. 28–33. (In Russian).

59. Alekseichik V.V., Bolgov V.T. Problems of energy consumption accounting, control and management at an industrial enterprise and ways to solve them. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2002, no. 3, pp. 6–14. (In Russian).

60. Vadzhilov F.R., Shmyrov V.A., Yakovlev A.A., Nadeina M.S. Automated system for control, accounting and management of power consumption on the basis of the CTS “Energia” in “Arkhangelsk Commercial Sea Port” JSC. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Power Engineering]. 2003, no. 1, pp. 6–11. (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 620. 93

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-147-154>

МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ ЗАЖИГАНИЯ АВТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОАГРЕГАТА АЭ-1 С ПОМОЩЬЮ МОЛЕКУЛЯРНОГО НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ

© П.Ю. Полозов¹, Е.Г. Поршнева²

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В данной работе проведено изучение возможности ремонта автономного электроагрегата (АЭ-1) применяемого для запуска дизельных двигателей в полевых условиях при отсутствии запасных частей и квалифицированных специалистов. **МЕТОДЫ.** Для запуска дизель-генераторов электростанций 5И57А применяется автономный электроагрегат АЭ-1, имеющий в своем составе молекулярные накопители энергии (МНЭ). Одной из неисправностей данного агрегата является выход из строя магнето. Был проведен эксперимент по устранению данной неисправности в наиболее короткий срок и замене магнето на электронное зажигание. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Достоинство модернизации состоит в том, что ремонт может быть произведен достаточно быстро персоналом, не имеющим высокой квалификации. Недостатком является то, что при работе в данном режиме теряется мощность двигателя. Но, учитывая, что работоспособность восстановлена, временем заряда молекулярных накопителей в связи с потерей мощности можно пренебречь. **ВЫВОДЫ.** Найдено наиболее приемлемое решение ремонта системы зажигания АЭ-1 в полевых условиях при отсутствии запасных частей и специалистов ремонтных органов. Замена магнето на аварийное зажигание обеспечивает работу данного устройства и дает возможность в нештатных ситуациях производить запуск дизельных двигателей.

Ключевые слова: автономный электроагрегат АЭ-1, аккумуляторная батарея, военная кафедра, молекулярные накопители энергии (МНЭ), коммутатор, конденсатор, стартерный пуск, электроагрегат.

Информация о статье. Дата поступления 13 марта 2018 г.; дата принятия к печати 18 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Полозов П.Ю., Поршнева Е.Г. Модернизация системы зажигания автономного электроагрегата АЭ-1 с помощью молекулярного накопителя энергии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 147–154. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-147-154

MODERNIZATION OF STANDBY ELECTRIC GENERATING UNIT IGNITION SYSTEM BY MEANS OF MOLECULAR ENERGY STORAGE

P.Yu. Polozov, E.G. Porshneva

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
29, Polytechnicheskaya St, Saint Petersburg, 195251, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. This work studies the possibility of repairing a standby electric generating unit used to start diesel engines in field conditions in the absence of spare parts and qualified specialists. **METHODS.** To start diesel generators of power stations 5И57А a standby electric generating unit is used. It includes molecular energy storages (MES). One of the faults of this unit is magneto failure. An experiment was carried out to eliminate this fault in the shortest possible time and replace the magneto with electronic ignition. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The advantage of modernization is that repair could be done quickly enough by not highly qualified personnel. The drawback is that the engine

¹Полозов Павел Юрьевич, старший преподаватель кафедры воздушно-космических сил, e-mail: pavel.polozov.1965@mail.ru

Pavel Yu. Polozov, Senior Lecturer of the Department of Aerospace Forces, e-mail: pavel.polozov.1965@mail.ru

²Поршнева Елена Геннадьевна, кандидат педагогических наук, доцент кафедры воздушно-космических сил, e-mail: a_porshneva@mail.ru

Elena G. Porshneva, Candidate of Pedagogics, Associate Professor of the Department of Aerospace Forces, e-mail: a_porshneva@mail.ru



operating in this mode loses its power. But taking into account restored working capacity, the charging time of molecular storages due to the loss of power can be neglected. **CONCLUSIONS.** The most acceptable solution for the repair of the standby electric generating unit ignition system in field conditions in the absence of spare parts and repair specialists has been found. Replacement of magneto with emergency ignition ensures the operation of this device and allows to start diesel engines in emergency situations.

Keywords: *standby electric generating unit, battery, military department, molecular energy storages (MES), switch, capacitor, start-up, electric generating unit*

Information about the article. Received March 13, 2018; accepted for publication June 18, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Polozov P.Yu., Porshneva E.G. Modernization of standby electric generating unit ignition system by means of molecular energy storage. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 147–154. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-147-154 (In Russian).

Введение

В настоящее время существует проблема надежного пуска дизельных двигателей военных автомобилей и генераторных установок в условиях низких температур. Постоянно проводится усовершенствование пусковых устройств, поскольку из-за низкой емкости аккумуляторных батарей (АКБ) при пониженных температурах уменьшается вероятность надежного пуска агрегатов.

Основным требованием для военной техники является необходимость проведения надежного пуска двигателя при

отрицательных температурах: до -25°C – без предварительного прогрева охлаждающей жидкости и масла, и до -40°C – с использованием пусковых жидкостных подогревателей двигателя (ПЖД). Для облегчения пуска двигателя применяются различные устройства, часть из которых будет рассмотрена ниже.

Целью данного исследования является проведение модернизации системы зажигания автономного электроагрегата АЭ-1 для работы в аварийных режимах.

Материалы и методы исследования

Для надежного пуска двигателя необходимо привести во вращение коленчатый вал с частотой вращения, которая обеспечит процесс смесеобразования и воспламенения топливовоздушной смеси. При малых оборотах коленчатого вала происходит утечка смеси через неплотности поршневых колец, при больших оборотах происходит быстрый разряд АКБ.

Для пуска двигателей военной техники существуют различные способы. Например, используется пуск электрическим стартером и сжатым воздухом. Система пуска сжатым воздухом является дополнительной (аварийной).

Преимущество системы – создание большого пускового момента, особенно при одновременном пуске электростартером и сжатым воздухом. Недостаток – необходимость наличия большого количества до-

полнительной аппаратуры и обслуживающего персонала.

Характеристики свинцово-кислотных аккумуляторных батарей при отрицательных температурах ухудшаются, эффективность стартерного пуска падает, так как уменьшается энергия, получаемая стартером от АКБ (при понижении температуры емкость батареи снижается) и увеличивается момент сопротивления вращению из-за загустевшего масла. В создавшейся ситуации стартерный привод не сможет раскрутить коленчатый вал до пусковой частоты вращения.

Следующим способом надежного запуска двигателей, в том числе дизельных, а также дизель-генераторов, является использование молекулярных накопителей энергии (МНЭ) [1–5].

При проведении работ в условиях



низких температур, при полевых выходах техники, при работе с разряженными аккумуляторными батареями и в других подобных случаях при работах на военной технике применяется автономный электроагрегат АЭ-1, включающий МНЭ [6].

Молекулярный накопитель энергии является мощным быстро заряжаемым источником стартерного тока в системах электрического пуска с номинальным напряжением 24 В для двигателей автомобилей и дизель-генераторов.

Что же такое молекулярный накопитель энергии? Это конденсатор или «суперконденсатор» – устройство, выполненное в герметичном корпусе на основе активированных углей. За счет двойного электрического слоя на межфазной поверхности электрод–электролит обеспечиваются высокие мощностные характеристики. Это дает возможность пуска двигателя и продолжительной эксплуатации средства без использования стартерной АКБ.

Молекулярный накопитель энергии является конденсатором большой емкости. Он выполняет функцию фильтра низких и высоких частот и улучшает качество напряжения в бортовой сети [1].

МНЭ допускает долговременное подключение к бортовой сети при ежедневной эксплуатации. На время простоя техники рекомендуется отключение МНЭ от АКБ.

Технические характеристики МНЭ:

1. Напряжение заряда:
 - номинальное – 24 В;
 - максимальное – 30 В.
2. Номинальная электрическая емкость – 100 Ф.
3. Динамическая емкость при стартерном разряде – не менее 75 Ф.
4. Внутреннее сопротивление – 0,005 Ом.
5. Ток утечки – не более 6 мА.
6. Сопротивление изоляции между корпусом и токовыводами – не менее 20 МОм.
7. Масса – 34 кг.
8. Назначенный срок службы – 15 лет.

9. Гарантийный срок эксплуатации – 7 лет.

10. Гарантийный срок хранения – 10 лет.

Корпус молекулярного накопителя энергии представляет собой герметичный цилиндр диаметром 230 мм из нержавеющей стали и состоит из обечайки и крышек, сваренных друг с другом аргонодуговой сваркой.

Токовыводы расположены на торцевых сторонах цилиндра. Внутри находятся блоки накопительных элементов, представляющие собой многослойную тонкопленочную конструкцию, состоящую из пористых углеродных электродов, сепаратора и токосъемных пластин.

Подсоединение МНЭ к электрической цепи производится при помощи медных шин или многожильных проводов сечением 50–90 мм², которые крепятся к токовыводам при помощи болта с установкой плоской и пружинной шайб, поставляемых совместно с изделием. Положительный вывод МНЭ имеет маркировку «+», отрицательный маркировки не имеет.

МНЭ в составе системы стартерного пуска (СЭП) во время работы может находиться в следующих состояниях:

- *заряд* (подзаряд) накопителя до номинального напряжения может осуществляться от штатной аккумуляторной батареи либо от отдельного источника питания (генератора или сетевого зарядного устройства);
- *стартерный разряд* совместно с АКБ при пуске двигателя (при этом сначала заряженный МНЭ подключается к АКБ, а затем – к СЭП);
- *стартерный разряд* без АКБ при пуске двигателя;
- *подзаряд* до напряжения бортовой сети во время работы двигателя за счет штатного зарядного генератора;
- *саморазряд* после отключения МНЭ от АКБ на период длительного простоя двигателя; несмотря на малые токи утечки, перед подключением МНЭ к АКБ необходим подзаряд, порядок проведения которого указан ниже [7–9].



При использовании в составе СЭП нескольких МНЭ они соединяются параллельно. Подключение незаряженного накопителя к СЭП не допускается, потому что это может привести к выходу батареи из строя из-за перегрузки, в связи с очень малым внутренним сопротивлением МНЭ (0,005 Ом), что приведет к режиму короткого замыкания АКБ.

Допускается зарядка МНЭ от АКБ через токоограничивающее сопротивление (резистор). В качестве токоограничивающего резистора можно использовать штатную электролампу-переноску номинальным напряжением 24 В и мощностью около 100 Вт. Прекращение свечения лампы будет свидетельствовать о завершении заряда МНЭ, после этого возможно подключение МНЭ к СЭП автомобиля или дизель-генератора [10, 11].

Достоинством МНЭ является то, что специального обслуживания не требуется. Во время эксплуатации проводятся работы по поддержанию чистоты поверхности для уменьшения токов саморазряда, а также проверка надежности креплений резьбовых соединений, очистка от пыли и грязи, подтяжка ослабленных соединений, проверка наличия смазки на резьбовых соединениях [12, 13].

Недостатком является неремонтопригодность изделия: при выходе из строя МНЭ заменяется новым. Учитывая большой гарантийный срок эксплуатации, использование накопителей является целесообразным [14, 15].

На военной кафедре Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого для запуска дизель-генераторов электростанций 5И57А применяется автономный электроагрегат АЭ-1. Со студентами проводятся занятия по запуску и обслуживанию данного агрегата, в том числе по поиску неисправностей и их устранению. Одной из неисправностей яв-

ляется выход из строя магнето. Поэтому был проведен эксперимент по устранению данной неисправности в наиболее короткий срок.

Устройство АЭ-1, с которым производился эксперимент, представляет собой бензиновый генератор, состоящий из двигателя МДЗ производства Владимирского тракторного завода номинальной мощностью 2,2 кВт, частотой вращения 3600 оборотов в минуту, автомобильного генератора с выходным напряжением 24 (27) В, непосредственно молекулярных накопителей энергии (2 штуки, включены параллельно) и панели управления.

Агрегат предназначен для выработки и хранения электроэнергии постоянного тока и стартерного запуска дизельных двигателей автомобилей, дизель-генераторных станций и агрегатов при параллельном включении со штатной аккумуляторной батареей или без нее. Именно это дает возможность производить пуски при отсутствии штатных аккумуляторных батарей (напряжение 24 В, большая емкость).

Агрегат электрический имеет систему зажигания с использованием магнето. При выходе из строя магнето в полевых условиях, что происходит достаточно часто, и отсутствии в данный момент времени специалистов ремонтных органов восстановление работоспособности данного агрегата представляет собой достаточно большую сложность. Необходим демонтаж двигателя вместе с генератором, его разборка и ремонт, что занимает много времени. Кроме этого за ограниченное время найти запасные части и специалистов по ремонту не всегда представляется возможным.

В целях сокращения времени на ремонт при условии отсутствия запасных частей был проведен эксперимент по замене штатной системы зажигания на электронную систему аварийного зажигания от отечественных автомобилей.

Результаты исследования и их обсуждение

Достоинство данной модернизации состоит в том, что ремонт может быть про-

изведен достаточно быстро из находящихся под рукой деталей или деталей, которые



могут быть приобретены в ближайшем магазине автозапчастей, либо сняты с автомобиля обслуживающим персоналом, не имеющим высокой квалификации.

Недостатком является то, что при работе в аварийном режиме теряется мощность двигателя. Потеря мощности составляет примерно 25–30%. В данном случае, учитывая, что работоспособность восстановлена, временем заряда молекулярных накопителей можно пренебречь.

В ходе данного эксперимента для зажигания использовались запасные части автомобиля ВАЗ 2108 (рис. 1, 2): катушка зажигания Б115В 763774, блок аварийного

зажигания АЗ-1, штатная аккумуляторная батарея автомобиля ВАЗ 2109 6СТ55А и жгут проводов 2108-3724026-40.

Схема подключения аварийного зажигания представлена на рис. 3.

Штатное зажигание отключается путем снятия высоковольтного провода со свечи зажигания. Катушка зажигания, коммутатор, блок аварийного зажигания крепятся на внутренней стенке агрегата при помощи саморезов с режущей гранью, аккумуляторная батарея устанавливается поверх молекулярных накопителей на штатной площадке (рис. 4).



a

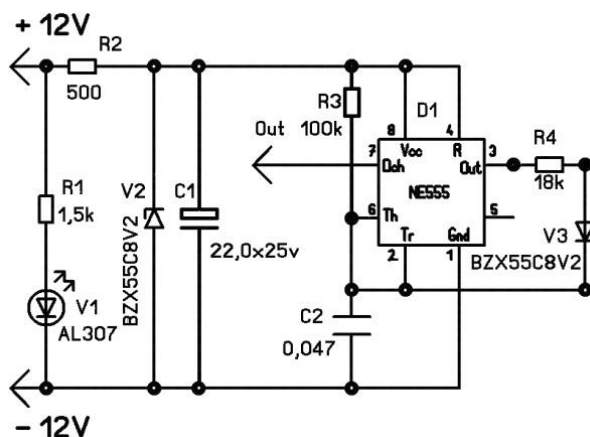


b

Рис. 1. Катушка зажигания Б115В 763774 (a) и коммутатор 36.3734 (b)
Fig. 1. Ignition coil Б115В 763774 (a) and a switch 36.3734 (b)



a



b

Рис. 2. Блок аварийного зажигания АЗ-1 (a) и схема АЗ-1 (b)
Fig. 2. Block of emergency ignition АЗ-1 (a) and circuit АЗ-1 (b)

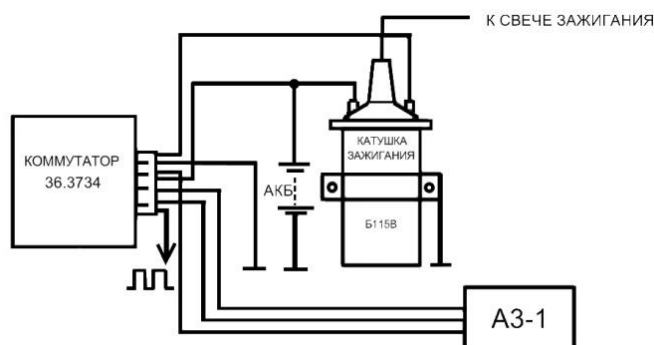


Рис. 3. Схема подключения аварийного зажигания
Fig. 3. Emergency ignition connection diagram

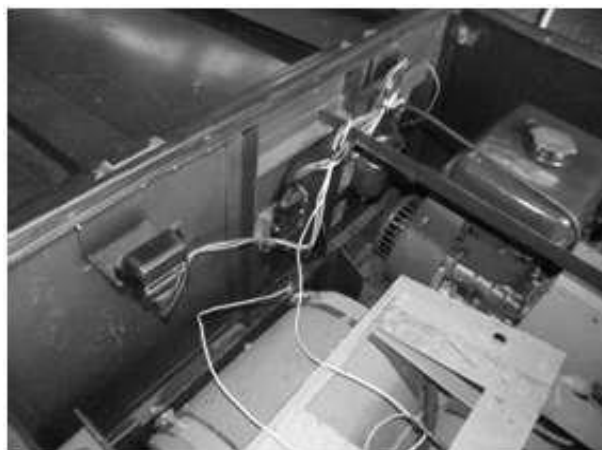


Рис. 4. Внешний вид подключения аварийного зажигания
Fig. 4. External view of emergency ignition connection

Коммутатор использует накопление энергии в конденсаторе, а не в электромагнитном поле катушки зажигания. При поступлении управляющего сигнала (в данном случае от блока аварийного зажигания) схема подключает заряженный конденсатор к обмоткам катушки, через которую он, разряжаясь, вызывает появление искры³.

Коммутатор позволяет, обеспечивая мощную искру, улучшить пуск при пониженной температуре, значительно уменьшить потери в трамблере, стабилизировать обороты холостого хода и снизить расход топлива.

Блок аварийного зажигания АЗ-1 представляет собой генератор импульсов и включается вместо датчика Холла трам-

блера (распределителя). Блок дает возможность создания большого количества импульсов независимо от положения коленчатого вала.

Поскольку какая-то из искр близка к точке зажигания, то происходит воспламенение горючей смеси и двигатель начинает работать. В связи с тем что момент зажигания происходит не в строго определенный момент времени, двигатель работает с потерей мощности.

Заряд аккумуляторной батареи 6СТ55А в процессе работы можно проводить с помощью выпрямительного устройства 24/12 В после того, как АЭ-1 зарядит накопители до напряжения 22–24 В.

³Смирнов В.Л., Прохоров Ю.С., Костенко В.Л., Бояр В.С., Зимин В.А., Капралов А.В. Автомобили ВАЗ. Электрооборудование. Технология технического обслуживания и ремонта. Н. Новгород: АТИС, 2002. 96 с. / Smirnov V.L., Prokhorov Yu.S., Kostenko V.L., Boyur V.S., Zimin V.A., Kapralov A.V. VAZ automobiles. Electrical equipment. Technology of maintenance and repair. Novgorod: ATIS Publ., 2002, 96 p.



Выводы

Данная работа была проведена для того, чтобы найти наиболее приемлемое решение вопросов ремонта системы зажигания АЭ-1 в полевых условиях при отсутствии запасных частей (магнето) и/или специалистов ремонтных органов. Эксперимент показал, что замена магнето на ава-

рийное зажигание обеспечивает работу данного устройства и дает возможность в аварийных ситуациях производить запуск дизельных двигателей автомобилей, электростанций и электроагрегатов, тем самым гарантируя безотказное функционирование техники в сложных условиях.

Библиографический список

1. Лебедев С.А. Комбинированные источники тока в составе пусковых устройств для систем электро-стартерного пуска // Грузовик. 2009. № 10. С. 14–26.
2. Лебедев С.А., Антипенко В.С., Антипенко С.В. Комбинированные источники тока в системах пуска двигателей автомобилей // Грузовик. 2008. № 10. С. 15–18.
3. Кучак С.В., Харитонов С.А. Автономная система электроснабжения на основе дизель-генераторной установки и накопителя электрической энергии на базе литий ионного аккумулятора // Наука. Технологии. Инновации (НТИ–2013): материалы VII Всерос. науч. конф. молодых ученых (Новосибирск, 21–24 ноября 2013 г.). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. С. 170–173.
4. Штанг А.А., Ярославцев М.В. Контакт-аккумуляторный маневровый электровоз с накопителем энергии на основе литий-ионных аккумуляторов // Электроника и электрооборудование транспорта. 2016. № 1. С. 13–16.
5. Гумелев В.Ю., Картуков А.Г. Энергоблок автомобиля УРАЛ-4320-31 [Электронный ресурс] // Современные научные исследования и инновации: электронный научно-практический журнал. 2013. № 1 (21). URL: <http://web.snauka.ru/issues/2013/01/19855> (12.03.2018).
6. Кучак С.В. Имитационная модель автономной системы электроснабжения на основе дизель-генераторной установки и накопителя электрической энергии на базе литий-ионного аккумулятора // Наука. Технологии. Инновации (НТИ–2014): материалы VIII Всерос. науч. конф. молодых ученых (Новосибирск, 02–06 декабря 2014 г.). Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. С. 3–5.
7. Тарасов Б.П., Володин А.А., Фурсиков П.В., Сивак А.В., Кашин А.М. Системы аккумулирования энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2014. № 2. С. 133–134.
8. Десятов А.В., Колесников В.А., Крюков А.Ю., Ми-

- лютина А.Д., Колесников А.В. Исследование электрохимического поведения макетных образцов накопителей энергии с углеродными электродами // Теоретические основы химической технологии. 2016. Т. 50. № 6. С. 645–656.
9. Тарасов Б.П., Володин А.А., Фурсиков П.В., Сивак А.В., Кашин А.М. Системы аккумулирования энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2014. № 22 (162). С. 30–41.
10. Бердников Р.Н., Фортов В.Е., Сон Э.Е., Деньщиков К.К., Жук А.З., Новиков Н.Л., Шакарян Ю.Г. Гибридный накопитель электроэнергии для ЕНЭС на базе аккумуляторов и суперконденсаторов // Энергия единой сети. 2013. № 2 (7). С. 40–51.
11. Ляхов С.В., Алешко А.А. Повышение транспортных качеств электробусов за счет использования гибридных накопителей энергии // Перспективы развития транспортного комплекса: материалы II Международ. заочной науч.-практ. конф. (Минск, 04–06 октября 2016 г.). Минск: Изд-во БелНИИТ «Транс-техника», 2016. С. 7–10.
12. Колобов М.Г., Климов В.И., Дубинин А.В., Москалев М.В. Гибридный накопитель энергии для транспорта // Электричество. 2011. № 10. С. 26–30.
13. Сердечный Д.В., Томашевский Ю.Б. Управление процессом заряда многоэлементных литий-ионных аккумуляторных батарей // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2017. № 3 (21). С. 115–123.
14. Козлов С.В., Киндряшов А.Н., Соломин Е.В. Анализ эффективности систем накопления энергии // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология». 2015. № 2 (166). С. 29–34.
15. Попель О.С., Тарасенко А.Б. Сравнительный анализ систем длительного аккумулирования энергии для источников резервного и аварийного питания, а также энергоустановок на возобновляемых источниках энергии // Теплоэнергетика. 2012. № 11. С. 61.

References

1. Lebedev S.A. Using the molecular drives to energy in composition of the auxiliary sources of the current. *Gruzovik* [Truck]. 2009, no. 10, pp. 14–26. (In Russian).
2. Lebedev S.A., Antipenko V.S., Antipenko S.V. Com-

- lined sources of current in vehicle engine start-up systems. *Gruzovik* [Truck]. 2008, no. 10, pp. 15–18. (In Russian).
3. Kuchak S.V., Haritonov S.A. *Avtonomnaya sistema*



elektrosnabzheniya na osnove dizel'-generatornoi ustanovki i nakopitelya elektricheskoi energii na baze litii ionnogo akkumulyatora [Autonomous power supply system based on the diesel generator and a power storage device with the lithium-ion battery]. *Materialy VII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh "Nauka. Tekhnologii. Innovatsii (NTI-2013)"* [Proceedings of VII All-Russia scientific conference of young scientists "Science. Technology. Innovations (STI-2013)"]. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publ., 2013, pp. 170–173. (In Russian).

4. Shtang A.A., Yaroslavcev M.V. Battery-electric shunting locomotive with lithium-ion storage batteries. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta* [Electronics and electrical equipment of transport]. 2016, no. 1, pp. 13–16. (In Russian).

5. Gumelev V.Yu., Kartukov A.G. Power unit of the vehicle URAL-4320-31. *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii: Elektronnyi nauchno-prakticheskii zhurnal* [Modern scientific researches and innovations: electronic scientific and practical journal]. 2013. No. 1 (21). Available at: <http://web.snauka.ru/issues/2013/01/19855> (accessed 12 March 2018).

6. Kuchak S.V. *Imitatsionnaya model' avtonomnoi sistemy elektrosnabzheniya na osnove dizel'-generatornoi ustanovki i nakopitelya elektricheskoi energii na baze litii-ionnogo akkumulyatora* [Simulation model of the autonomous power supply system based on diesel generator and electric energy storage device with a lithium-ion battery]. *Materialy VIII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii molodykh uchenykh "Nauka. Tekhnologii. Innovatsii (NTI-2014)"* [Proceedings of VIII All-Russia scientific conference of young scientists "Science. Technology. Innovations (STI-2013)"]. Novosibirsk: Novosibirsk State Technical University Publ., 2014, pp. 3–5. (In Russian).

7. Tarasov B.P., Volodin A.A., Fursikov P.V., Sivak A.V., Kashin A.M. Energy storage systems. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal "Alternativnaya energetika i ekologiya"* [International scientific journal for alternative energy and ecology]. 2014, no. 2, pp. 133–134. (In Russian).

8. Desyatov A.V., Kolesnikov V.A., Kryukov A.Yu., Milyutina A.D., Kolesnikov A.V. Investigation of electrochemical behaviour of storage device prototypes with

carbon electrodes. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoi tekhnologii* [Theoretical Foundations of Chemical Engineering]. 2016, no. 6, pp. 645–656. (In Russian).

9. Tarasov B.P., Volodin A.A., Fursikov P.V., Sivak A.V., Kashin A.M. Energy storage systems. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal "Alternativnaya energetika i ekologiya"* [International scientific journal for alternative energy and ecology]. 2014, no. 22(162), pp. 30–41. (In Russian).

10. Berdnikov R.N., Fortov V.E., Son E.E., Den'shchikov K.K., Zhuk A.Z., Novikov N.L., Shakaryan Yu.G. Hybrid power storage device for Federal Grid Company based on batteries and supercapacitors. *Energiya edinoi seti* [Energy of the grid network]. 2013, no. 2 (7), pp. 40–51. (In Russian).

11. Lyahov S.V., Aleshko A.A. *Povyshenie transportnykh kachestv elektrobusev za schet ispol'zovaniya gibridnykh nakopitelei energii* [Improving electric bus transport qualities due to the use of hybrid energy storage devices]. *Materialy II Mezhdunarodnoi zaochnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Perspektivy razvitiya transportnogo kompleksa"* [Proceedings of II International correspondent scientific and practical conference "Development prospects of Transport Complex"]. Minsk: Belarusian Research Institute of Transport «Transtekhnika», 2016, pp. 7–10.

12. Kolobov M.G., Klimov V.I., Dubinin A.V., Moskaev M.V. Hybrid energy storage device for vehicles. *Elektrichestvo* [Electricity]. 2011, no. 10, pp. 26–30. (In Russian).

13. Serdechniy D.V., Tomashevskiy Yu.B. The control of a multi-element charge lithium-ion batteries. *Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol'* [Measurement. Monitoring. Operation. Control]. 2017, no. 3 (21), pp. 115–123. (In Russian).

14. Kozlov S.V., Kindryashov A.N., Solomin E.V. Analysis of energy storage systems efficiency. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal "Alternativnaya energetika i ekologiya"* [International scientific journal for alternative energy and ecology]. 2015, no. 2 (166), pp. 29–34. (In Russian).

15. Popel' O.S., Tarasenko A.B. Comparative analysis of long-term energy storage systems for backup and emergency power supply sources and for renewable energy power stations. *Teploenergetika* [Heat Power Engineering]. 2012, no. 11, p. 61. (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.



Оригинальная статья / Original article

УДК 620.91(571.53) «312/313»

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-155-163>

ОЦЕНКА РЕСУРСОВ УГЛЯ ВОСТОЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА УГОЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

© А.Д. Соколов¹, Л.Н. Такайшвили²

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ. Восточные регионы России располагают значительным потенциалом для развития добычи энергетических углей. Высокая обеспеченность запасами углей позволяет рассматривать уголь как надежный источник топлива для электростанций на длительную перспективу. **ЦЕЛЬ.** Выполнить оценку запасов и ресурсов угля, пригодного для нужд энергетики. **МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ.** Для решения поставленной задачи использованы официальные статистические данные и результаты расчетов авторов. Исследования проведены с применением методов системного анализа, расчеты выполнены на экономико-математических моделях, разработанных авторами. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В статье дана оценка запасов углей восточных регионов, пригодных для использования на действующих и новых электростанциях. Представлены перспективные месторождения этих углей, рассматриваемые в проектах и программных документах строительства электростанций по субъектам федерации. Также приведены месторождения угля, перспективные для строительства электростанций, но не рассмотренные в стратегических планах развития. Выполнена оценка запасов углей этих месторождений и возможных объемов добычи. Приведены основные качественные характеристики углей месторождений: калорийность, содержание золы, серы, влаги. Дана краткая характеристика горно-геологических и гидрологических условий разработки месторождений. Показано, что угли восточных регионов содержат в своем составе ценные сопутствующие элементы. Выполнена оценка благоприятных и сдерживающих факторов развития представленных месторождений угля. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В дальнейшем уголь по-прежнему будет одним из основных энергоносителей в топливно-энергетическом балансе восточных регионов. Наиболее перспективным с позиций экономики и экологии представляется создание промышленных кластеров на базе месторождений угля.

Ключевые слова: энергетический уголь, балансовые запасы, восточные регионы России, добыча, проекты.

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

Формат цитирования: Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Оценка ресурсов угля восточных регионов России для строительства угольных электростанций // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 155–163. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-155-163

EVALUATION OF COAL RESOURCES IN EASTERN REGIONS OF RUSSIA FOR CONSTRUCTION OF COAL POWER STATIONS

A.D. Sokolov, L.N. Takaishvili

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

ABSTRACT. The Eastern regions of Russia have a significant potential for the development of power-generating coal production. High provision with coal reserves allows to treat coal as a long term and reliable fuel for power plants. The **PURPOSE** of the paper is to evaluate the reserves and resources of coal applicable for use in the power sector.

¹Соколов Александр Данилович, доктор технических наук, заведующий лабораторией «ТЭК Сибири и Дальнего Востока», e-mail: sokolov@isem.irk.ru

Aleksandr D. Sokolov, Doctor of technical sciences, Head of the Laboratory of Energy Sector of Siberia and Far East, e-mail: sokolov@isem.irk.ru

²Такайшвили Людмила Николаевна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории «ТЭК Сибири и Дальнего Востока», e-mail: luci@isem.irk.ru

Lyudmila N. Takaishvili, Candidate of technical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Energy Sector of Siberia and Far East, e-mail: luci@isem.irk.ru



MATERIAL AND METHODS. The set task is solved on the basis of the official statistical data and calculation results of the authors. The study uses the system analysis methods. The calculations are carried out on the economic and mathematical models constructed by the authors. **RESULTS.** The paper estimates coal reserves in the Eastern regions of Russia applicable for use at existing and new power plants. The coal deposits promising for the construction of power plants in the subjects of the federation and considered in the projects and program documents are described. Coal deposits promising for the construction of power plants but not included in strategic development plans are also described. The coal reserves in these deposits and potential volumes of coal production are assessed. The main qualitative characteristics of the coals in the deposits under investigation are indicated including heat value, content of ash, sulphur and moisture. A brief characteristic of mining-geological and hydrological conditions for deposit development is given. Coals of the Eastern regions are shown to contain valuable accompanying elements. Favorable and limiting factors for the development of the presented coal deposits are evaluated. **CONCLUSION.** In the long run coal will remain one of the main energy carriers in the energy balance of the Eastern regions. Creation of industrial clusters on the basis of coal deposits seems highly promising in terms of economy and ecology.

Keywords: power-generating coal, balance reserves, Eastern regions of Russia, production, projects

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

For citation: Sokolov A.D., Takaishvili L.N. Evaluation of coal resources in eastern regions of Russia for construction of coal power stations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 155–163. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-155-163 (In Russian).

Введение

В восточных регионах России – в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке, имеются значительные запасы угля, представленные каменными, бурыми углями и антрацитом. Основную часть запасов углей (90%) составляют энергетические угли. Высококачественные каменные угли пригодны для экспорта. Бурые угли, каменные угли, не удовлетворяющие требованиям по качеству для экспорта, а также низкокачественные продукты обогащения каменных углей являются топливом для электростанций. Согласно прогнозам, составленным Международным энергетическим агентством (International Energy Agency) [1] и Независимым агентством в составе федеральной статистической системы США (U.S. Energy Information Administration – EIA) [2], спрос на электроэнергию в странах Азии возрастет, следовательно, возрастет и спрос на энергоресурсы. Наличие значительных ресурсов угля в восточных регионах и обеспеченность запасами углей (примерно на 700

лет) позволяет рассматривать уголь в качестве надежного источника топлива как для существующих, так и для новых электростанций на длительную перспективу. Месторождения энергетических углей восточных регионов России располагаются в регионах, отличающихся по развитости транспортной и социальной инфраструктур, по горно-геологическим, гидрологическим и другим характеристикам [3]. Исследование возможностей развития угольной промышленности восточных регионов России проводилось многими авторами, назовем, к примеру, работы [4–6]. Однако оценка ресурсов углей восточных регионов для сооружения электростанций авторами этих работ не выполнялась. Представляется актуальным исследование ресурсов угля восточных регионов России для сооружения электростанций с использованием системы моделей и информационной системы, разработанных при участии авторов настоящей статьи [7, 8].

Ресурсы угля восточных регионов России

Прогнозные ресурсы угля восточных регионов нашей страны составляют 3184,9 млрд т или 82% от прогнозных ресурсов угля России (3927,7 млрд т.) [8]. Балансовые запасы углей категорий А+В+С1 (запа-

сы, которые перспективно разрабатывать при современном уровне развития техники и экономики) составляют 88 млрд т (табл. 1).



Таблица 1

Структура запасов угля восточных регионов, млн т

Table 1

Structure of coal reserves in the eastern regions, billion t

Вид угля	Балансовые запасы по категориям			Забалансовые
	A+B+C1	C2	A+B+C1+C2	
Всего	88,02	39,36	127,38	28,37
– Бурый	61,14	25,48	86,62	11,86
– Каменный	26,85	13,85	40,71	16,49
из них коксующиеся	9,01	4,53	13,55	1,36
– Антрацит	0,03	0,03	0,05	0,02
Включая, пригодные для открытой разработки				
Всего	71,33	28,00	99,34	15,19
– Бурый	57,73	22,59	80,32	10,25
– Каменный	13,59	5,41	19,00	4,93
из них коксующиеся	2,21	0,37	2,58	0,05

Как видно из табл. 1, объемы забалансовых запасов (28,4 млрд т) и запасов угля категории C2 (39,4 млрд т) значительны и поэтому в дальнейшем могут явиться объектом промышленного освоения. Степень изученности запасов (отношение балансовых запасов к прогнозным ресурсам) низкая, она составляет всего 2,8%. Следовательно, имеются перспективы наращивания балансовых запасов угля. Для этого требуется выполнение соответствующих геологоразведочных работ для постановки прогнозных ресурсов угля на баланс.

В балансовых запасах углей восточных регионов преобладают запасы энергетических углей. Большая часть запасов уг-

лей восточных регионов (81% от объемов запасов) пригодна для открытой добычи. Из запасов бурых углей для открытой добычи пригодны 95% от объемов запасов. Низкокачественные бурые угли не могут транспортироваться на значительные расстояния, поэтому наиболее целесообразное их использование – это производство электроэнергии на борту разрезов. Каменные угли большинства месторождений восточных регионов также могут служить топливом для электростанций. Низкокачественные продукты обогащения коксующихся и энергетических углей являются ресурсами для энергетики.

**Запасы угля восточных регионов по субъектам Федерации
для строительства электростанций**

Месторождения углей восточных регионов, перспективные для развития угольной энергетики, представлены на рисунке.

В Республике Тыва разведанные запасы угля категорий A+B+C1 составляют 2,9 млрд т, а категории C2 – 1,0 млрд т. Запасы угля представлены каменными, в основном коксующимися углями особо ценных марок. Ресурсы в энергетику после обогащения углей месторождений коксующихся углей могут составить до 8 млн т/год.

Красноярский край располагает значительными запасами энергетических углей категорий A+B+C1 – 45,5 млрд т, категории C2 – 20,7 млрд т. В регионе находятся крупнейшие месторождения бурого угля – Абанское, Бородинское, Березовское. Суммарные запасы этих месторождений составляют 54,6 млрд т, где добыча может составить 102 млн т, в том числе: на действующих предприятиях Бородинского и Березовского месторождений – 67 млн т, на новом предприятии Абанского месторождения – 35 млн т.



Месторождения угля восточных регионов России для строительства электростанций
Coal deposits in the eastern regions of Russia for the construction of power stations

В Иркутской области разведанные запасы угля категорий А+В+С1 составляют 8,1 млрд т, угля категории С2 – 6,6 млрд т. В структуре запасов преобладают каменные угли (73%), для открытой разработки пригодны 7,7 млрд т (96% от разведанных запасов). Суммарные запасы перспективных месторождений составляют 6,6 млрд т. Добыча угля на этих месторождениях может составить 43,5 млн т, в том числе: на действующих предприятиях Мугунского и Головинского месторождений – 18 млн т, на новых предприятиях – 25,5 млн т.

В Республике Бурятия разведанные запасы угля категорий А+В+С1 составляют 2,2 млрд т, категории С2 – 0,3 млрд т. В структуре запасов доля бурых углей составляет 63%, для открытой разработки пригодны 0,9 млрд т (50% от разведанных запасов). Суммарные запасы перспективных месторождений составляют 0,3 млрд т. Добыча угля на этих месторождениях за счет строительства новых угледобывающих предприятий может составить 19 млн т.

В Забайкальском крае разведанные запасы угля категорий А+В+С1 составляют 3,1 млрд т, угля категории С2 – 0,2 млрд т. В структуре запасов доля бурых углей составляет 62%, для открытой разработки пригодны 2,8 млрд т (93% от разведанных запасов). Суммарные запасы перспективных месторождений составляют 1,2 млрд т. Добыча угля на перспективных месторож-

дениях может составить до 50 млн т, в том числе на действующем предприятии Харанорского разреза – 15 млн т.

В Республике Саха (Якутия) разведанные запасы угля категорий А+В+С1 составляют 9,7 млрд т, категории С2 – 4,6 млрд т. Более половины запасов (5,3 млрд т) представлено каменными углями, из которых 4,1 млрд т являются коксующимися углями особо ценных марок. Для открытых работ пригодны 66% разведанных запасов углей. Ресурсы в энергетику после обогащения углей месторождений каменных углей могут составить до 9 млн т/год.

В Хабаровском крае разведанные запасы угля категорий А+В+С1 составляют 1,6 млрд т, угля категории С2 – 0,7 млрд т. В структуре запасов преобладают каменные угли (80%), для открытой разработки пригодны 0,5 млрд т – 31% от разведанных запасов. Нарращивание объемов добычи планируется на действующих предприятиях Ургальского месторождения подземным и открытым способами.

В Приморском крае разведанные запасы угля категорий А+В+С1 составляют 2,3 млрд т, а категории С2 – 1,4 млрд т. В структуре запасов преобладают бурые угли – 2,1 млрд т, для открытой разработки пригодны 1,4 млрд т (63% от разведанных запасов). Суммарные запасы перспективных месторождений составляют 1,2 млрд т. Добыча угля на перспективных месторожде-



ниях может составить 9 млн т, в том числе на действующем предприятии – Бикинском разрезе – 7 млн т.

В Амурской области разведанные запасы угля категорий А+В+С1 составляют 3,6 млрд т, категории С2 – 0,2 млрд т. Основная часть запасов представлена бурыми углями – 3,5 млрд т, пригодными для открытой добычи. Суммарные запасы перспективных месторождений составляют 3,5 млрд т. Добыча угля на этих месторождениях может составить 42 млн т в основном за счет строительства новых угледобывающих предприятий.

В Сахалинской области разведанные запасы угля категорий А+В+С1 составляют 1,8 млрд т, категории С2 – 0,6 млрд т.

Запасы бурого и каменного угля составляют 0,95 и 0,85 млрд т соответственно. Для открытой добычи пригодно только 0,17 млрд т. Планируется увеличение добычи угля на действующем Солнцевском разрезе до 5 млн т, в перспективе – до 10 млн т угля в год.

Планируемые сроки реализации проектов сооружения новых угледобывающих предприятий и реконструкции действующих – 2017–2030 годы. В силу инерционности развития угольной промышленности и несбалансированности реального спроса на уголь и объемов добычи, планируемых в программных документах, сроки реализации проектов, как правило, сдвигаются на более поздние периоды.

Характеристика месторождений угля для развития угольной энергетики

Восточная Сибирь и Дальний Восток располагают достаточными разведанными запасами угля для развития энергетики в целях снабжения потребителей как внутри страны, так и за рубежом. Анализ ресурсной базы углей позволил выявить наиболее перспективные месторождения угля восточных регионов для строительства электростанций (табл. 2) [9–14].

В настоящее время в различных государственных, федеральных и региональных программах и стратегиях рассматривается строительство в Восточной Сибири и на Дальнем Востоке крупных электростанций, работающих на угле. В табл. 3 приведен перечень месторождений угля, пригодного для использования на электростанциях, строительство которых рассматривается в программных документах, например, в «Долгосрочной программе развития угольной промышленности России на период до 2030 года»³. Предполагается строительство угольных ТЭС с использованием как рядового угля, так и низкосортных продуктов переработки коксую-

щегося и энергетического угля.

Анализ ресурсной базы углей восточных регионов России позволяет рассматривать кроме представленных в табл. 3 и другие месторождения (см. рис. 1). К ним относятся: Абанское месторождение в Красноярском крае; Головинское, Вознесенское и Каранцайское – в Иркутской области; Свободное, Сергеевское, Тыгдинское – в Амурской области. Наличие существенных балансовых запасов угля в восточных регионах создает возможности для развития добычи углей за счет нового строительства и расширения мощностей действующих электростанций.

На большинстве представленных месторождений добыча угля возможна наиболее эффективным – открытым – способом. Горно-геологические и гидрологические условия разработки месторождения – от простых до средней сложности. Толщина перспективных для разработки угольных пластов (от 1,5 м и более) на отдельных месторождениях (Абанское в Красноярском крае) может достигать 25 м. Коэффициенты

³Долгосрочная программа развития угольной промышленности России на период до 2030 года; утв. распоряжением Правительства Российской Федерации от 24.01.2012 г. № 14-п / Long-term development program of Russian coal industry for the period up to 2030; approved by the order of the Government of the Russian Federation of 24 January 2012 No. 14-p



Таблица 2

Характеристика месторождений углей для строительства электростанций

Table 2

Characteristic of coal deposits for power plant construction

Месторождение	Запасы, млн т	Потенциаль- ные объемы добычи, млн. т	Качественные характеристики*			
			Q^r , МДж / кг	A^d , %	S^d , %	W^r , %
Абанское	16766,8	35	14–16	8–15	0,3–0,8	31–38
Ишидейское	831,7	12	21–31	17–20	0,5–1,8	14–15
Мугунское	1639,3	13	17–20,1	16–21	0,5–1,6	18–20,6
Головинское	186,0	5	19,7–23	13–23	0,4–2,8	14
Вознесенское	518,6	8	23–33	15–29	0,9–1,5	7,8–16
Харанцайское	3080,5	4	22	15	3,4	8,8–11,8
Никольское	173,5	14,5	24	18	0,4–0,9	6
Загустайское	123,0	4,5	19	22	0,7	24
Харанорское	742,4	15	12–13	5–25	0,3–0,7	33–44
Зашуланское, Красночикойское	837,5	15–20	18–23	10–19	0,5–0,7	6–25/15
Пограничное, Приозерное, Кутимское	360	4,5	14,9–16,6	23–32	0,3–0,8	15–22
Чикандинское	12,5	1,2	22	17–23	0,1–0,4	1,5–7
Ургальское	1270,6	12	22,6–33,5	17–33	0,2–0,5	4,5–34
Павловское, Раковское	463,9	2	11–12	16–33	0,3–0,5	41–44,5
Бикинское	908,9	7	8–24	18–35	0,4–1,0	34,44
Ерковецкое	1040,2	18	12,3–13,4	15–18	0,3–0,6	35,7–38,2
Огоджинское	15,4	5	18,1–23,2	17–37	0,3–0,5	4,3–6,3
Свободное, Сергеевское	1982,2	9	26,8–26,9	18–19	0,3–0,4	51–53,4
Тыгдинское	466,3	10	7,3	20	0,3	57,2
Солнцевское	93,4	10	16–19,1	11–24	0,2–0,3	23

*Примечание. Q^r – низшая теплота сгорания; A^d – зола; S^d – сера; W^r – общая влага.

Таблица 3

Месторождения угля, пригодного для строительства электростанций

Table 3

Deposits of coal applicable for use at power plants to be constructed

Месторождение	Мощность проектируемых электростанций, МВт
Ерковецкое	4800
Харанорское	2400
Ургальское	2400
Ишидейское	2000
Зашуланское, Красночикойское	1500
Мугунское	900
Пограничное, Приозерное, Кутинское	900
Ерковецкое	700
Харанорское	660
Месторождения Забайкальского, Хабаровского, Приморского краев, Республики Саха (Якутия), Амурской и Сахалинской областей	1600*

*Суммарно по станциям мощностью ниже 600 МВт³.



вскрыши составляют от 2 до 6 м³/т. В районах с развитой инфраструктурой находятся месторождения Иркутской, Сахалинской и Амурской областей, Приморского и Хабаровского краев, южных регионов Забайкальского края. Месторождения с неразвитой инфраструктурой находятся в северных регионах субъектов федерации. Основная сложность освоения некоторых месторождений связана с климатическими условиями и обводненностью месторождений.

Угли восточных регионов имеют в своем составе ряд ценных попутных компонентов [15, 16]. Угли месторождений Амурской области: Огоджинское, Свободное и Сергеевское, имеют в своем составе золото, местами в промышленной концентрации⁴. Угли Ерковецкого месторождения содержат платину, Бикинского – германий и сопутствующие ему элементы, Ишидейского – кремний. Угли других месторождений восточных регионов также содержат ценные сопутствующие компоненты. Сопутствующие компоненты могут извлекаться непосредственно из угля, из отходов угледобычи (газы, породы, воды), из золы и газов после сжигания угля на объектах энергетики. В углях содержатся также радионуклеиды, такие как уран, радон, радий,

торий, а также радиоизотопы свинца и калия.

К благоприятным факторам разработки перспективных месторождений относятся:

- наличие значительных запасов углей;
- относительно простые или средней сложности горно-геологические и гидрологические условия разработки месторождений;
- большинство месторождений находится в районах с развитой инфраструктурой;
- значительные объемы добычи возможны на действующих предприятиях, в регионах с развитой инфраструктурой.

На развитие большинства перспективных месторождений могут повлиять следующие сдерживающие развитие факторы:

- ограничения существующей транспортной инфраструктуры или ее отсутствия;
- разработка отдельных месторождений, в особенности на Дальнем Востоке, осложняется обводненностью месторождений бурого угля;
- экологические ограничения.

Заключение

Наличие значительных запасов углей в восточных регионах России может стать надежной базой снабжения топливом действующих и новых электростанций, в том числе для экспорта электроэнергии.

Суммарные балансовые запасы угля на месторождениях угля перспективных для строительства электростанций составляют 31,8 млрд т. Возможные объемы добычи на этих месторождениях оцениваются в более чем 180 млн т, в том числе за счет

расширения мощности и реконструкции действующих предприятий – 60–65 млн т.

Наиболее перспективным с позиций экономики и экологии представляется создание промышленных кластеров на базе месторождений угля, объединяющего в себе предприятия: по добыче и переработке угля и техногенных отходов, электростанций, работающих на угле и газе из угольных пластов, углехимических и других предприятий⁵. В качестве конечных продук-

⁴Решения научно-практической конференции «Перспективы развития углехимии в России: наука, технологии и производства». Кемерово, 2016. 14 с. / Decisions of the scientific and practical conference “Development prospects of Russian coal chemistry: Science, Technology and Production”. Kemerovo, 2016. 14 p.

⁵Программа развития инновационного территориального кластера «Комплексная переработка угля и техногенных отходов» в Кемеровской области. Краткое изложение. 2012. 46 с. / Program for the development of the innovative territorial cluster “Integrated processing of coal and technogenic waste” in the Kemerovo region. Brief account. 2012. 46 p.



тов в подобных проектах являются, кроме электроэнергии, продукты с высокой добавленной стоимостью, полученные при переработке угля, дегазации угольных пластов, шахтных вод, шлаков и выбросов в атмосферу после сжигания угля на электростанциях. Извлечения сопутствующих углю ценных элементов является одним из важных шагов для перехода к чистым технологиям сжигания.

Экологические аспекты широкомасштабного развития угледобычи для строительства электростанций требуют основа-

тельной проработки.

Выбор последовательности и приоритетов в освоении месторождений требует проведения исследований по оценке эффективности освоения и строительства новых электростанций на рассматриваемых месторождениях.

Работа выполнена в рамках научного проекта XI.174.2. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310435-0.

Библиографический список

1. World Energy Outlook 2016 [Электронный ресурс] // International Energy Agency. URL: <http://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html> (19.06.2018).
2. International Energy Outlook 2017 [Электронный ресурс] // U.S. Energy Information Administration. URL: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf) (19.06.2018)
3. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Тенденции развития угольной промышленности восточных регионов России как составляющей топливно-энергетического комплекса на перспективу // Вестник ИрГТУ. 2016. Т. 20. № 11. С. 157–169. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-157-169>
4. Плакиткина Л.С., Плакиткин Ю.А., Дьяченко К.И. Перспективы развития добычи угля в Дальневосточном федеральном округе в период до 2035 г. // Горный журнал. 2017. № 3. С. 57–61. DOI: 10.17580/gzh.2017.03
5. Мисевра О.А., Щадов М.И. Угольно-энергетический баланс Восточной Сибири и Дальнего Востока. М.: Изд-во МГИИ, 2003. 458 с.
6. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Угольная промышленность Байкальского региона: существующее состояние и перспективы развития // Вестник ИрГТУ. 2012. № 12 (71). С. 112–118.
7. Агафонов Г.В., Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Моделирование развития угольной промышленности // Известия РАН. Энергетика. 2011. № 6. С. 159–165.
8. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Реализация информационного обеспечения для прогнозирования развития угольной промышленности регионов России // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 1 (41). С. 126–133.
9. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2016 года. Вып. 91. Уголь. Т. I. Сводные данные. М., 2016. 382 с.
10. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2016 года. Вып. 91. Уголь. Т. VII. Сибирский федеральный округ, часть 2. М., 2016. 314 с.
11. Государственный баланс запасов полезных ископаемых Российской Федерации на 1 января 2016 года. Вып. 91. Уголь. Т. VIII. Дальневосточный федеральный округ. М., 2016. 378 с.
12. Угольная база России. Том III. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири. Южная часть (Красноярский край, Канско-Ачинский бассейн; Республика Хакасия, Минусинский бассейн, Республика Тыва, Улугхемский бассейн). В 6 т. М.: Геоинформцентр, 2002. 488 с.
13. Угольная база России. Том IV. Угольные бассейны и месторождения Восточной Сибири (Тунгусский и Таймырский бассейны; месторождения Забайкалья). В 6 т. М.: Изд-во ЗАО «Геоинформмарк», 2001. 493 с.
14. Угольная база России. Том V. Книга первая. Угольные бассейны и месторождения Дальнего Востока (Хабаровский край, Амурская область, Приморский край, Еврейская АО). В 6 т. М.: Изд-во ЗАО «Геоинформмарк», 1997. 638 с.
15. Арбузов С.И., Машенькин В.С., Рыбалко В.И., Судыко А.Ф. Редкометалльный потенциал углей Северной Азии (Сибирь, Российский Дальний Восток, Казахстан, Монголия) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 3с-2. С. 41–44.
16. Голицын М.В., Вялов В.И., Богомолов А.Х., Пролина Н.В., Макарова Е.Ю., Митронов Д.В., Кузеванова Е.В., Макаров Д.В. Перспективы развития технологического использования углей в России // Георесурсы. 2015. № 2 (61). С. 41–53.

References

1. World Energy Outlook 2016. International Energy Agency. Available at: <http://www.iea.org/newsroom/news/2016/november/world-energy-outlook-2016.html> (accessed 19 June 2018).



2. International Energy Outlook 2017. U.S. Energy Information Administration. Available at: [https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/ieo/pdf/0484(2017).pdf) (accessed 19 June 2018).
3. Sokolov A.D., Takajshvili L.N. Promising development trends of the coal industry in the eastern regions of Russia as a part of the fuel and energy sector. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, vol. 20, no. 11, pp. 157–169. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-11-157-169> (In Russian).
4. Plakitkina L.S., Plakitkin Yu.A., D'yachenko K.I. Development prospects of coal mining in the Far Eastern Federal District in the period until 2035. *Gornyy zhurnal* [Mining Journal]. 2017, no. 3, pp. 57–61. DOI: 10.17580/gzh.2017.03. (In Russian).
5. Misevra O.A., Shchadov M.I. *Ugol'no-energeticheskii balans Vostochnoi Sibiri i Dal'nego Vostoka* [Coal and energy balance of Eastern Siberia and the Far East]. Moscow: Moscow state Mining Institute Publ., 2003, 458 p. (In Russian).
6. Sokolov A.D., Takajshvili L.N. Baikal region coal industry: current state and development prospects. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2012, no. 12 (71), pp. 112–118. (In Russian).
7. Agafonov G.V., Sokolov A.D., Takajshvili L.N. Modeling of coal industry development. *Izvestiya RAN Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering]. 2011, no. 6, pp. 159–165. (In Russian).
8. Sokolov A.D., Takajshvili L.N. Approach to the development and implementation of information support forecasting of coal industry development of Russian regions. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2014, no. 1 (41), pp. 126–133. (In Russian).
9. *Gosudarstvennyi balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiiskoi Federatsii na 1 yanvarya 2016 goda* [The state balance of mineral resources of the Russian Federation as of January 1, 2016]. Issue 91. *Ugol'* [Coal]. Vol. I. *Svodnye dannye* [Consolidated data]. Moscow, 2016, 382 p. (In Russian).
10. *Gosudarstvennyi balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiiskoi Federatsii na 1 yanvarya 2016 goda* [The state balance of mineral resources of the Russian Federation as of January 1, 2016.]. Issue 91.

Критерии авторства

Соколов А.Д. и Такайшвили Л.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Ugol' [Coal]. Vol. VII. *Sibirskii federal'nyi okrug, chast' 2* [Siberian Federal District]. Moscow, 2016, 314 p. (In Russian).

11. *Gosudarstvennyi balans zapasov poleznykh iskopaemykh Rossiiskoi Federatsii na 1 yanvarya 2016 goda* [The state balance of mineral resources of the Russian Federation as of January 1, 2016]. Issue 91. *Ugol'* [Coal]. Vol. VIII. *Dal'nevostochnyi federal'nyi okrug* [Far Eastern Federal District]. Moscow, 2016, 378 p. (In Russian).

12. *Ugol'naya baza Rossii*. [Coal base of Russia]. Volume III. *Ugol'nye basseiny i mestorozhdeniya Vostochnoi Sibiri. Yuzhnaya chast' (Krasnoyarskii krai, Kansk-Achinskii bassejn; Respublika Khakasiya, Minusinskii bassejn, Respublika Tyva, Ulughemskii bassejn)* Coal basins and deposits of Eastern Siberia. The southern part (the Krasnoyarsk Territory, the Kansk-Achinsk Basin, the Republic of Khakassia, the Minusinsk Basin, the Republic of Tyva, the Ulughem Basin)]. In 6 volumes. Moscow: Geoinformcentr Publ., 2002, 488 p. (In Russian).

13. *Ugol'naya baza Rossii* [Coal base of Russia]. Volume IV. *Ugol'nye basseiny i mestorozhdeniya Vostochnoi Sibiri (Tungusskii i Taimyrskii basseiny; mestorozhdeniya Zabaikal'ya)* [Coal basins and deposits of Eastern Siberia (Tunguska and Taimyr basins, deposits of Transbaikalia)]. In 6 volumes. Moscow: ZAO "Geoinformmark" Publ., 2001, 493 p. (In Russian).

14. *Ugol'naya baza Rossii* [Coal base of Russia]. Volume V. Book 1. *Ugol'nye basseiny i mestorozhdeniya Dal'nego Vostoka (Habarovskii krai, Amurskaya oblast', Primorskii krai, Evreiskaya AO)* [Coal basins and deposits of the Far East (Khabarovsk Territory, Amur Region, Primorsky Territory, Jewish Autonomous Region)]. In 6 volumes. Moscow: ZAO "Geoinformmark" Publ., 1997, 638 p. (In Russian).

15. Arbuzov S.I., Mashen'kin V.S., Rybalko V.I., Sudyko A.F. Rare-metal potential of coals in Northern Asia (Siberia, Russian Far East, Kazakhstan, Mongolia). *Geologiya i mineral'no-syr'evye resursy Sibiri* [Geology and Mineral Resources of Siberia]. 2014, no. 3с-2, pp. 41–44. (In Russian).

16. Golitsyn M.V., Vyalov V.I., Bogomolov A.H., Pronina N.V., Makarova E.Yu., Mitronov D.V., Kuzevanova E.V., Makarov D.V. Future considerations for technological use of coals in Russia. *Georesursy* [Georesources]. 2015, no. 2 (61), pp. 41–53. (In Russian).

Authorship criteria

Sokolov A.D. and Takajshvili L.N. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621. 762

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-164-180>

РАЗРАБОТКА НАУЧНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСНОВ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА КАРБИДА ЦИРКОНИЯ

© Т.И. Алексеева¹, Г.В. Галевский², В.В. Руднева³, С.Г. Галевский⁴

Сибирский государственный индустриальный университет,
654007, Российская Федерация, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42.

РЕЗЮМЕ. Данное исследование связано с разработкой научных и технологических основ плазмохимического производства карбида циркония. **ЦЕЛЬ.** Разработка научных и технологических основ получения нанокристаллического карбида циркония с использованием результатов теоретических и экспериментальных исследований плазмохимических процессов карбидообразования. **МЕТОДЫ.** При исследовании использовалось математическое моделирование процесса с применением константного метода. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработан непрерывный технологический процесс получения карбида циркония в плазмохимическом реакторе. Спрогнозирована возможность применения карбида циркония в функциональных защитных покрытиях.

Ключевые слова: карбид циркония, физико-химические характеристики, термодинамическое моделирование, плазмосинтез, степень превращения, равновесные и квазиравновесные составы, плазмохимический реактор, выход карбида.

Информация о статье. Дата поступления 06 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 06 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В. Галевский С.Г. Разработка научных и технологических основ плазмохимического производства карбида циркония // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 164–180. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-164-180

DEVELOPMENT OF SCIENTIFIC AND TECHNOLOGICAL BASES OF PLASMA-CHEMICAL PRODUCTION OF ZIRCONIUM CARBIDE

T.I. Alekseeva, G.V. Galevsky, V.V. Rudneva, S.G. Galevsky

Siberian State Industrial University,
42, Kirov St., Novokuznetsk, 654007, Russian Federation

ABSTRACT. This research deals with the development of scientific and technological fundamentals of plasma-chemical production of zirconium carbide. The **PURPOSE** of the paper is development of scientific and technological foundations for the production of nanocrystalline zirconium carbide using the results of theoretical and experimental studies of plasma-chemical processes of carbide formation. **METHODS.** The study uses mathematical modeling of the process with the const method. **RESULTS.** A continuous technological process of zirconium carbide production in a plasma-chemical re-

¹Алексеева Татьяна Игоревна, аспирант, e-mail: kafcm@stsibsiu.ru

Tatiana I. Alekseeva, Postgraduate student, e-mail: kafcm@stsibsiu.ru

²Галевский Г.В., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлургии цветных металлов и химической технологии.

Galevsky G.V., Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy and Chemical Technology.

³Руднева В.В., доктор технических наук, профессор кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии.

Rudneva V.V., Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy and Chemical Technology.

⁴Галевский С.Г., кандидат экономических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов и химической технологии.

Galevsky S.G., Candidate of Economics, Associate Professor of the Department of Non-Ferrous Metals Metallurgy and Chemical Technology.



actor has been developed. A prediction is made on the possibility to use zirconium carbide in functional protective coatings.

Keywords: zirconium carbide, physical and chemical characteristics, thermodynamic modeling, plasma synthesis, transformation degree, equilibrium and quasi-equilibrium compositions, plasma-chemical reactor, carbide yield

Information about the article. Received April 06, 2018; accepted for publication June 06, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Alekseeva T.I., Galevsky G.V., Rudneva V.V., Galevsky S.G. Development of scientific and technological bases of plasma-chemical production of zirconium carbide. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 164–180. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-164-180 (In Russian).

Введение

Актуальность выбранной темы. Одной из важнейших задач химической технологии неорганических веществ является получение материалов для работы в экстремальных условиях – при высоких температурах и напряжениях, под воздействием агрессивных сред и т.п. В решении этих задач существенная роль принадлежит использованию соединений тугоплавких металлов с бором, углеродом, азотом, кремнием – боридов, карбидов, нитридов и силицидов, которые наряду с высокой твердостью и тугоплавкостью обладают жаростойкостью и жаропрочностью, специфическими физическими и химическими свойствами. Среди карбидов переходных металлов карбид циркония по сочетанию специальных свойств входит в лидирующую группу, уникально совмещая такие практически значимые свойства, как твердость, тугоплавкость, коррозионная стойкость в жидких, газовых и металлических средах, износостойкость.

Карбид циркония ZrC , исследованный и введенный в обращение научной школой известного российского ученого-материаловеда Г.В. Самсонова более 50 лет назад, до сих пор востребован в технологии различных материалов: металлокерамических инструментальных и конструкционных, огнеупорных и абразивных, для модифицирования покрытий. Анализ современной научно-технической информации отражает тенденцию перехода от применения карбида циркония крупнозерни-

стого к микро- и нанокристаллическому, что обусловлено стремлением ученых и технологов-практиков к достижению качественно нового уровня эксплуатационных свойств материалов и покрытий на его основе.

Современное производство карбида циркония базируется на карботермическом способе, который реализуется в нескольких технологических вариантах и применяется для получения карбида циркония при использовании его в составе материалов для абразивной обработки, напыления и наплавки, защитных покрытий. Однако стратегически важный нанокристаллический сегмент рынка карбида циркония полностью обеспечивается зарубежными поставщиками, среди которых такие компании, как «Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.» (США), «Hefei Kaier Nanotechnology & Development Ltd. Co» (Китай), «NEOMAT Co» (Латвия), «PlasmaChem GmbH» (Германия). Это обуславливает необходимость развития российской нанотехнологии карбида циркония.

Таким образом, исследование и технологическая реализация процессов карбидообразования при плазмохимической переработке цирконий-углеродсодержащего сырья является важной научно-практической задачей, имеющей большое значение для развития отечественной технологии многофункциональных соединений циркония, а также эффективного решения инновационных задач прикладного материаловедения.



Технологические решения в производстве и применении карбида циркония:
анализ, оценка и определение доминирующих тенденций
(обзор научно-технической литературы)

Физико-химические свойства карбида циркония: анализ, систематизация, оценка прикладной значимости.
В системе установлено существование одного соединения – монокарбида циркония с кубической гранецентрированной решеткой типа NaCl и параметром $a = 0,4692$ нм (пространственная группа O_h^5 –Fm3m) [1].

По своей структуре ZrC может быть отнесен к фазам внедрения.

Анализ физико-химических свойств карбида циркония приведен в работе [2]. Физические, химические, механические и адгезионные свойства карбида циркония представлены в табл. 1 [2–4].

Таблица 1

Физические, химические, механические и адгезионные свойства карбида циркония

Table 1

Physical, chemical, mechanical and adhesion properties of zirconium carbide

Характеристика	Значение
<i>Теплофизические свойства</i>	
Температура плавления, $T_{пл}$, К	3803
Температура кипения, $T_{кип}$, К	5373
Теплоемкость, C_{p298} , Дж/(моль·К)	37,91
Теплопроводность, λ_{298} , Вт/(м·К), $T=300$ К	11,60
Коэффициент термического расширения, $K^{-1} \cdot 10^{-6}$, $T=300$ К	7,01
<i>Стойкость против окисления</i>	
Температура, К / Время окисления, ч	1373 / 1,5; 1373 / 3,0; 1373 / 5,0
Изменение массы, кг/м ²	$\sim 22,5 \cdot 10^{-2}$; $\sim 40 \cdot 10^{-2}$; $\sim 55 \cdot 10^{-2}$
<i>Стойкость в жидких средах</i>	
Растворитель	Нерастворимый остаток, %
HNO ₃ (1:1)	76/6
H ₂ SO ₄ ($\rho = 1,84$)	97/99
H ₃ PO ₄ ($\rho = 1,21$)	96/88
H ₃ PO ₄ (1:3)	98/2
HClO ₄ ($\rho = 1,35$)	97/2
<i>Механические свойства</i>	
Плотность, $\rho \cdot 10^3$, кг/м ³	6,66
Модуль упругости, E , ГПа	4,12
Микротвердость, H_v , Па·10 ⁻⁹	29,00
Предел прочности, $\delta \cdot 10^{-8}$, Па ($T=300$ К):	
– при растяжении	10,5
– при сжатии	18,0
– при изгибе	4,4–6,0
<i>Адгезионные свойства</i>	
Расплавленный металл	Угол смачивания, град. / температура, К
Al	вакуум 150 / 1273
Si	вакуум 22 / 1773
Fe;	вакуум 40 / 1823
Co	вакуум 30 / 1723



Проведенный анализ доступной научно-технической и технологической литературы подтверждает, что карбид циркония входит в группу материалов, имеющих такие характеристики, как тугоплавкость, сверхтвердость, жаростойкость и жаропрочность [2]. Системные исследования карбида циркония в нанокристаллическом состоянии с использованием современной приборно-аналитической базы практически не проводились.

Технологические решения в производстве и применении карбида циркония. Анализ современного состояния производства карбида циркония приведен в работе [5]. Известные способы производства карбида циркония представлены в виде схемы на рис. 1 [1, 5].

Проведенный анализ позволяет выявить, что два способа – механосинтез и плазмосинтез, направлены на получение карбида в нанокристаллическом состоянии. Механосинтез карбида циркония, реализуемый обычно в высокоэнергетических мельницах с использованием шихты цирконий–углерод, ориентированный преимущественно на получение препаративных количеств нанопорошка карбида размерного диапазона 5–200 нм для исследования особенностей его физико-химических свойств в наносостоянии и обоснованного поиска новых областей применения, в течение последних 20 лет не претерпел существенных технологических и аппаратурных изменений и модернизаций и по своим показателям по-прежнему может быть отнесен к лабораторным [6–8].

Плазмосинтез карбида циркония – первая в его технологической истории попытка создания непрерывного процесса. Технологические основы плазмосинтеза, заложенные на рубеже 70–80 годов прошлого столетия, предполагают совместную переработку $ZrCl_4$ и пропан-бутановой технической смеси в плазменном потоке аргона и водорода, закалку продуктов плазмообработкой и их улавливание, внереакторную термическую обработку в инертной среде. Плазменный реактор мощностью 16,5 кВт обеспечивает производство карбида циркония в виде нанопорошка с частицами размерного диапазона 10–100 нм до 1 т в год. При этом нанопорошок характеризуется следующим содержанием, %: ZrC – 93,0–97,0; $C_{своб.}$ – 0,5–1,5; O – 2,0–5,0. Сам способ, оборудование и аппаратурно-технологическая схема для его реализации были освоены сначала для производства заказных партий в условиях Специального конструкторско-технологического бюро неорганических материалов АН Латвии, а позднее и до настоящего времени – для малотоннажного производства в условиях фирмы «NEOMAT Co» (Латвия) [5]. Достигнутые показатели позволяют рассматривать плазмосинтез как наиболее перспективный из известных способов получения карбида циркония в наносостоянии [9].

Карбид циркония стандартной granulometрии положительно опробован в составе твердых сплавов, антиэмиссионных, абразивных и коррозионностойких покрытий, что позволяет спрогнозировать его эффективное применение в наносостоянии в производстве поликристаллических



Рис. 1. Известные способы производства карбида циркония
Fig. 1. Known methods of zirconium carbide production



сверхтвердых материалов и изделий из них, в гальванотехнике при электроосаждении композиционных металломатричных покрытий, в металлургии алюминия при формировании защитных смачиваемых покрытий катодов электролизеров [10–12].

Анализ отечественного и мирового рынков карбида циркония и его сегментов свидетельствует о достаточно разнообразных предложениях производителей, ориентирующихся главным образом на поставку карбида циркония для производства абразивов, огнеупоров, пленочных покрытий,

металлокерамических мишеней и др. Данный анализ актуален и для решения задач исследовательского характера. Предлагаемый к реализации карбид циркония значительно отличается по химическому составу, дисперсности, уровню цен, объемам поставок. При этом рынок нанокристаллического карбида циркония обеспечивается в основном зарубежными производителями, что обуславливает необходимость отечественного освоения его производства как единственного направления эффективного импортозамещения [12].

Теоретическое исследование

Теоретическое исследование включает термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония.

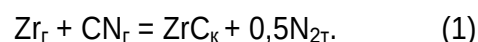
Термодинамическое моделирование плазмосинтеза карбида циркония: цели, задачи, объекты. Термодинамическое моделирование процессов синтеза проведено с целью прогнозирования оптимальных условий получения карбида циркония (соотношения компонентов и температуры), определения равновесных показателей процесса (степени превращения сырья в карбид, составов газообразных и конденсированных продуктов), оценки вклада в процессы карбидообразования газофазных реакций, обеспечивающих в условиях плазменных технологий эффективную переработку дисперсного сырья [13, 14].

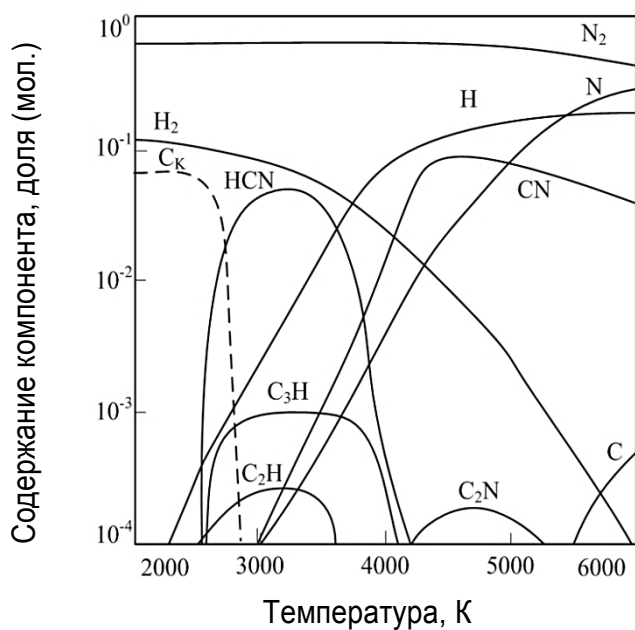
Объектами термодинамического моделирования являлись системы C-H-N, Zr-C-H-N и Zr-O-C-H-N, что обусловлено возможностью использования в качестве цирконийсодержащего сырья – циркония и его диоксида, углеводородного сырья – метана, плазмообразующего газа – азота. При расчетах рассматривалась область температур от 1000 до 6000 К при общем давлении в системе 0,1 МПа. Необходимые для анализа составы газообразных и конденсированных продуктов рассчитывались константным методом. Расчеты выполнялись с использованием программы компьютерного

моделирования высокотемпературных сложных химических равновесий «PLASMA», имеющей встроенную базу данных продуктов взаимодействия для оксидо-, боридо-, карбидо- и нитридообразующих систем. Соотношения исходных компонентов задавались в соответствии со стехиометрией реакций образования целевых продуктов и параметрами технологического оборудования (расход плазмообразующего газа).

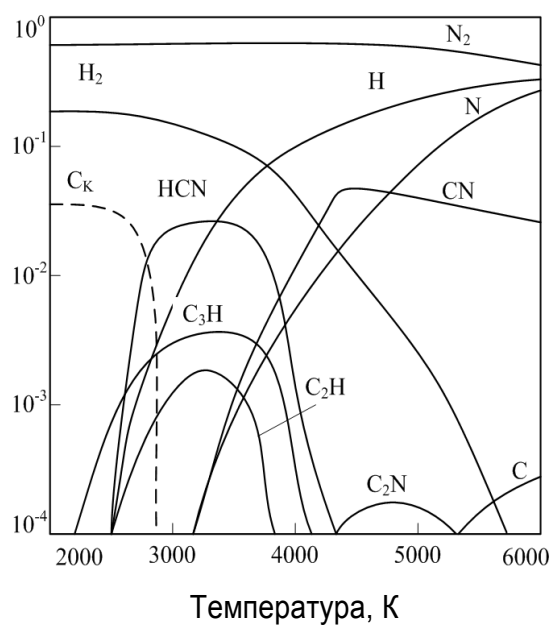
Анализ и результаты термодинамического моделирования плазмосинтеза карбида циркония. Анализ системы C-H-N (рис. 2) позволил выявить в равновесных условиях при 2800–3800 К присутствие HCN, CN, C₃H, C₂H. При этом до 98% углерода находится в газовой фазе в виде HCN. Квазиравновесные условия, отличающиеся значительным расширением температурной области стабильности циановодорода (2000–3800 К), позволяют получить состав конечных продуктов и основные показатели процесса, соответствующие экспериментальным данным.

Результаты термодинамических расчетов системы Zr-C-H-N приведены на рис. 3. В этой системе образование ZrC возможно по реакции

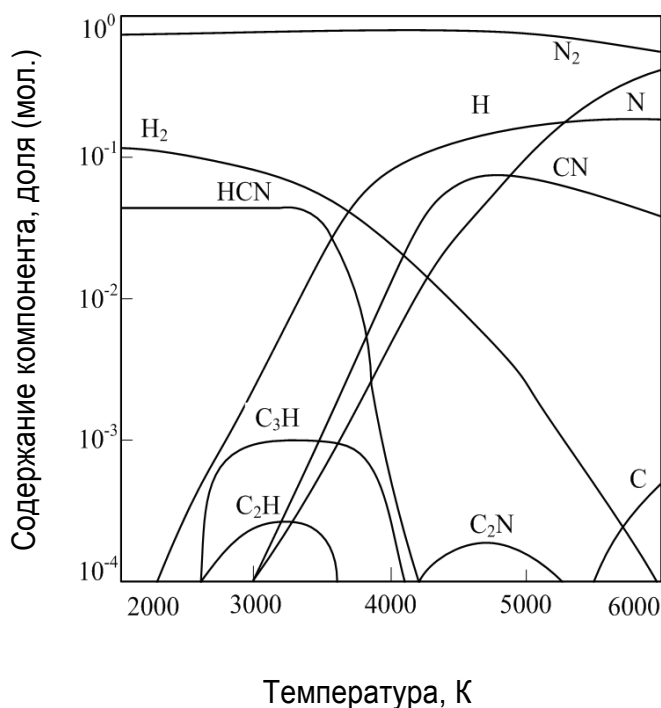




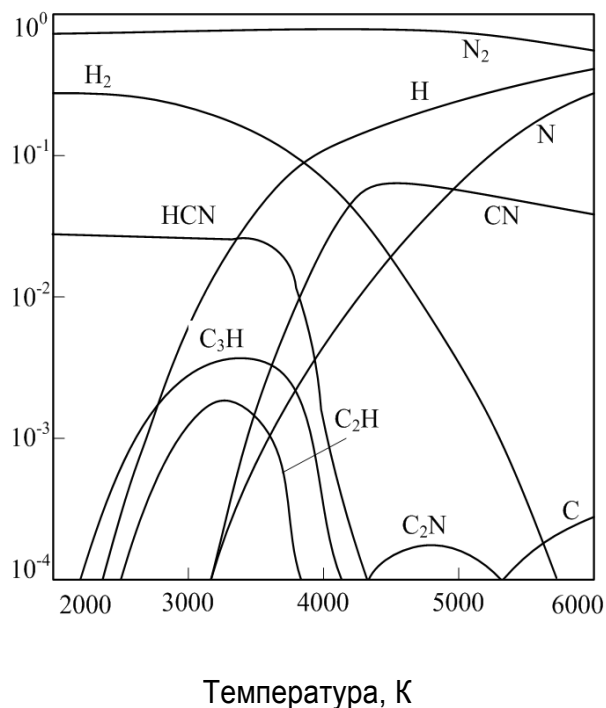
a – C:H:N=0,75:3:20



b – C:H:N=0,75:6:20



c – C:H:N=0,75:3:20



d – C:H:N=0,75:6:20

Рис. 2. Равновесный (а, б) и квазиравновесный (с, д) состав системы C-H-N в зависимости от соотношения компонентов и температуры
Fig. 2. Equilibrium (a, b) and quasi-equilibrium (c, d) composition of the system C-H-N depending on the ratio of components and temperature

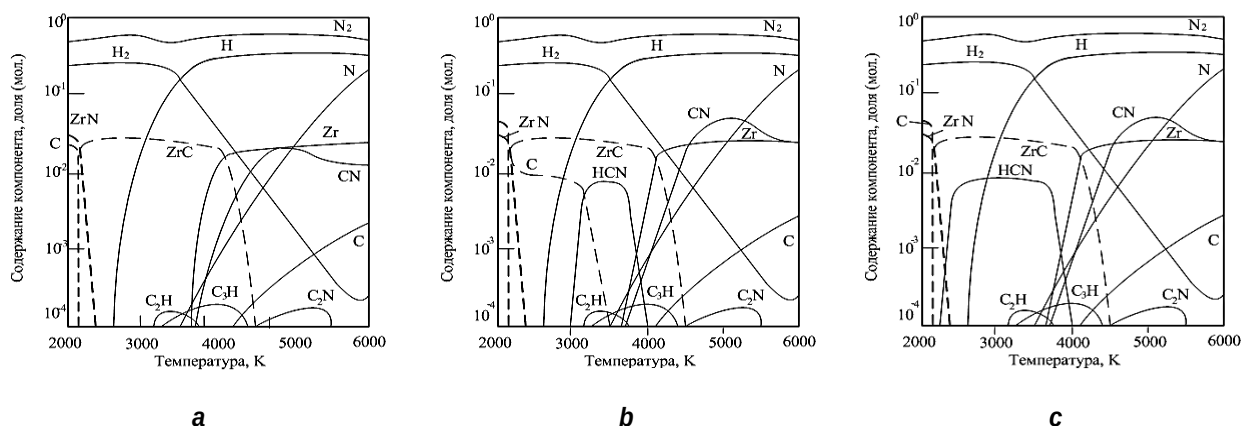


Рис. 3. Результаты термодинамических расчетов системы Zr-C-H-N:

a – равновесный состав газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Zr:C:H:N=0,25:0,25:1:20;

b – равновесный состав газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Zr:C:H:N=0,25:0,375:1,5:20;

c – квазиравновесный состав газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении Zr:C:H:N=0,25:0,375:1:20

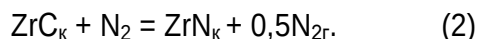
Fig. 3. Results of the thermodynamic calculations of Zr-C-H-N system:

a – equilibrium composition of gas and condensed phases as a function of temperature at the ratio of Zr:C:H:N = 0.25: 0.25:1:20;

b – equilibrium composition of gas and condensed phases as a function of temperature at the ratio of Zr:C:H:N = 0.25 0.375:1.5:20;

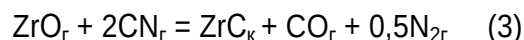
c – quasi-equilibrium composition of gas and condensed phases as a function of temperature at the ratio of Zr:C:H:N = 0.25:0.375:1:20

100%-ный выход ZrC достигается при стехиометрическом соотношении компонентов Zr:C в интервале температур 2300–4000 К. При избытке карбидизатора (соотношение Zr:C = 0,25:0,375) в условиях равновесия продуктом синтеза является карбид-углеродная композиция, содержащая 2,8% свободного углерода. В условиях квазиравновесия при избытке карбидизатора циановодород устойчив в области температур 2300–3800 К, что делает возможным получение карбида, не загрязненного пиролизическим углеродом. При температуре ниже 2300 К термодинамически возможным становится взаимодействие карбида с азотом по реакции



Результаты термодинамических расчетов системы Zr-C-O-H-N приведены на рис. 4. При изменении соотношения Zr:O:C от 0,25:0,50:0,19 до 0,25:0,50:0,75 степень превращения циркония в карбид

изменяется от 0,25 до 1. Карбид циркония устойчив в интервале температур 2300–4000 К. Образование ZrC возможно по реакциям (1) – до 98,5%, и (3) – до 1,5%:



При температуре ниже 2300 К термодинамически возможной становится реакция (2), приводящая к образованию нитрида ZrN.

Таким образом, установлено:

– в системе C-H-N в равновесных условиях 100%-ая газификация углерода достигается в интервале температур 2800–3800 К за счет образования циановодорода и углеводородных радикалов. До 98% углерода присутствует в газовой фазе в виде HCN. Квазиравновесные условия, исключющие образование конденсированного углерода, позволяют расширить температурный интервал термодинамической устойчивости циановодорода до 2300 К;

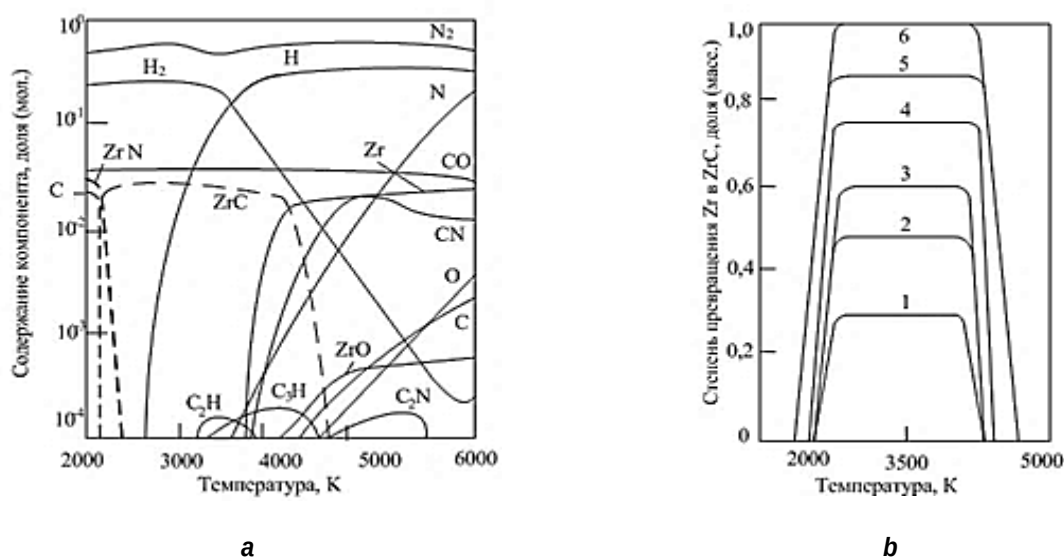


Рис. 4. Результаты термодинамических расчетов системы Zr-C-O-H-N:
a – равновесные составы газовой и конденсированной фаз в зависимости от температуры при соотношении $Zr:C:O:H:N=0,25:0,75:0,50:3:20$;
b – зависимость степени превращения Zr в ZrC от соотношения $Zr:C=0,25:0,20$ (1); $0,25:0,375$ (2); $0,25:0,47$ (3); $0,25:0,56$ (4); $0,25:0,66$ (5); $0,25:0,75$ (6)
Fig. 4. Results of thermodynamic calculations of Zr-C-O-H-N system:
a – equilibrium compositions of gas and condensed phases as a function of temperature at the ratio of $Zr:C:O:H:N = 0.25:0.75:0.50:3:20$;
b – dependence of transformation degree of Zr into ZrC on the ratio $Zr:C = 0.25:0.20$ (1); $0.25:0.375$ (2); $0.25:0.47$ (3); $0.25:0.56$ (4); $0.25:0.66$ (5); $0.25:0.75$ (6)

– в системах Zr-C-H-N и Zr-C-O-H-N образование карбида циркония термодинамически возможно по газофазным реакциям с участием паров циркония и циана, т.е. по схеме «пар–кристалл», что позволяет прогнозировать достижение его высокого выхода в реальных условиях плазмосинтеза;

– по результатам термодинамического моделирования подтверждена целесообразность экспериментального исследования предлагаемого варианта плазмосинтеза карбида циркония.

Экспериментальное исследование плазмосинтеза карбида циркония

Плазмохимический реактор и его технические характеристики. Для экспериментального исследования плазмосинтеза карбида циркония использовался трехструйный плазмохимический реактор, созданный совместными усилиями СибГИУ и НПФ «Полимет», включающий системы электро-, газо-, водоснабжения и вентиляции, контрольно-измерительных приборов и автоматики, дозирования шихтовых материалов и улавливания продуктов плазмообработки. Теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики реактора приведены в табл. 2, а методы их

экспериментального определения и расчета описаны в работе [15].

Сырье и технологические газы.

Выбор порошкообразного сырья и газов – восстановителя и теплоносителя, осуществлен по результатам моделирования взаимодействия сырьевого и плазменного потоков. Их характеристики приведены в табл. 3. Микрофотография диоксида циркония приведена на рис. 5, где можно видеть, что диоксид циркония марки ЦрО-1 представляет собой порошок размерного диапазона 0,5–5 мкм с частицами округлой формы, склонными к агрегированию.



Таблица 2

Основные характеристики реактора

Table 2

Basic characteristics of reactor

Характеристика	Значение
Мощность, кВт;	150
Удельная электрическая мощность, МВт/м ³	2140
Тип реактора	трехструйный прямоточный вертикальный
Тип плазмотрона	ЭДП-104А
Мощность, кВт	50
Плазмообразующий газ	азот
Футовка канала реактора	диоксид циркония
Масса нагреваемого газа, кг/ч;	32,5
Внутренний диаметр, м	0,054
Объем реактора, м ³	0,002
Температура плазменного потока, К	5400 (L*=0) – 2600 (L=20)
Температура футеровки, К	1650 (L=0) – 500 (L=20)
Ресурс работы, ч:	
– анода	3000–3200;
– катода	100–110
Загрязнение карбида циркония продуктами эрозии, %:	
– анода	Cu – 0,0001
– катода	W – 0,000002

*L – относительная длина реактора.

Таблица 3

Основные характеристики порошкообразного сырья и технологических газов

Table 3

Basic characteristics of powdered raw materials and process gases

Порошкообразное сырье и технологические газы	Содержание основного вещества, %, не менее
Диоксид циркония ЦрО (ГОСТ 21907-76, изм.)	99,0
Метан (природный газ)	93,6 (этан – 3,0; пропан – 2,18; бутан – 1,18)
Технический водород (ГОСТ 3022-80, изм.)	99,8
Технический азот (ГОСТ 9293-84, изм.)	99,5 (содержание кислорода не более 0,5)

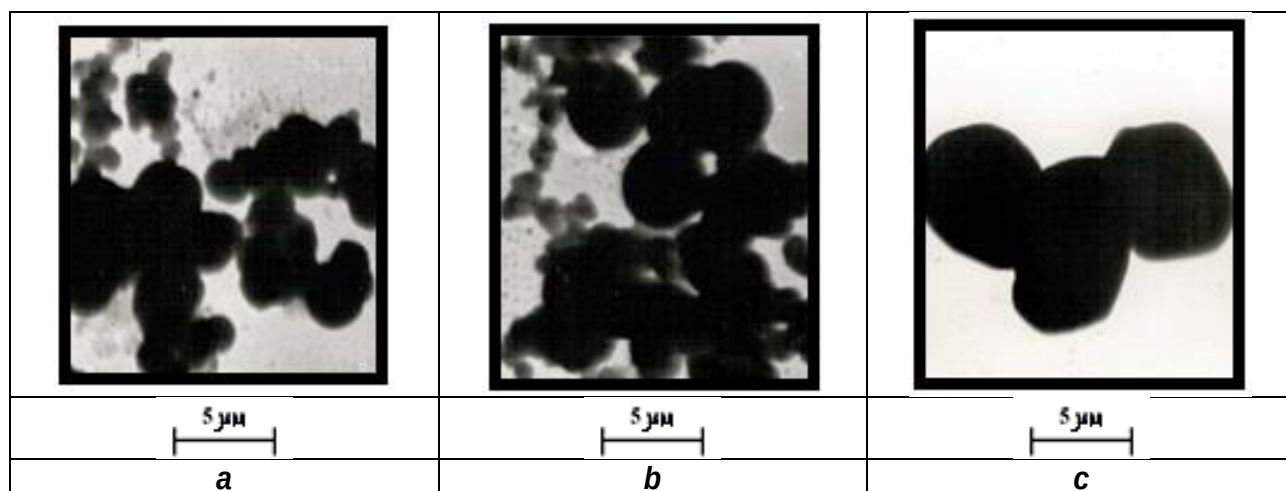


Рис. 5. Микрофотография диоксида циркония:

a – агрегат; b – частицы и агрегаты; c – частицы

Fig. 5. Micrograph of zirconium dioxide: a – aggregate; b – particles and aggregates; c – particles



Методы исследования продуктов плазмосинтеза. Продукты плазмосинтеза, уловленные в рукавном фильтре, исследовались с использованием рентгеновского, химического и электронно-микроскопического анализов, метода БЭТ для определения удельной поверхности (рис. 6) [16].

Применение метода планируемого эксперимента. Исследования проводились с привлечением метода планируемого эксперимента, позволяющего найти зависимость выхода (содержания) целевого продукта от определяющих факторов в виде интерполяционных уравнений⁵. В качестве модели выбран неполный квадратичный полином вида

$$\tilde{y} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{i < j} b_{ij} x_i \cdot x_j, \quad (4)$$

где $\tilde{y}$ – параметр оптимизации; b_0 , b_i , b_{ij} – коэффициенты; x_i – переменные факторы; $x_i \cdot x_j$ – двойные взаимодействия фак-

торов.

Данный полином учитывает главные эффекты факторов и все двойные взаимодействия. При этом предполагалось выполнение следующих условий регрессионной модели:

- 1) результат эксперимента – параметр y_1 – случайная величина, распределение которой нормальное;
- 2) дисперсии параметра равны и не зависят от места измерения;
- 3) переменные факторы фиксированы в каком-то интервале и не являются случайными величинами;
- 4) определитель матрицы плана не равен 0, т.е. матрица ортогональных уравнений имеет обратную матрицу.

Все условия, кроме второго, выполняются. Второе условие остается непроверенным ввиду недостаточного числа проведенных экспериментов.

Факторы, влияние которых учитывалось, и интервалы их варьирования приведены в табл. 4.

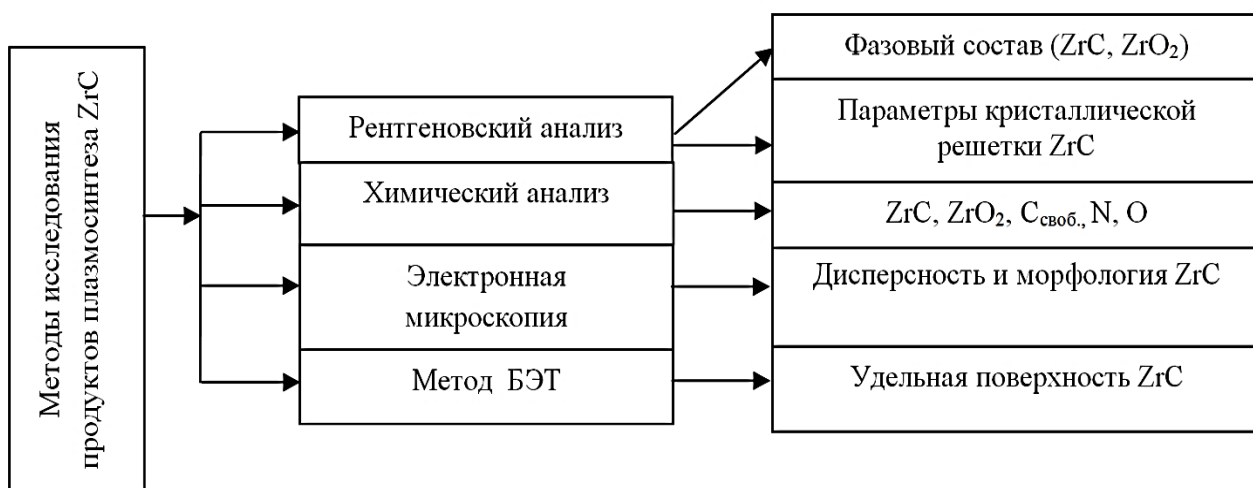


Рис. 6. Методы исследования продуктов плазмосинтеза карбида циркония
Fig. 6. Research methods of zirconium carbide plasma synthesis products

⁵Вершинин В.И., Перцев Н.В. Планирование и математическая обработка результатов химического эксперимента: учеб. пособие. Омск: Изд-во ОмГУ, 2005. 184 с. / Vershinin V.I., Pevtsov N.V. Planning and mathematical processing of chemical experiment results. Omsk: Omsk State University Publ., 2005. 184 p.



Таблица 4

Переменные факторы, выбранные для исследования процесса синтеза карбида циркония

Table 4

Variable factors chosen to study zirconium carbide synthesis

Фактор	Уровень фактора		
	Обозн.	Верхний (+)	Нижний (-)
Начальная температура плазменного потока, T_0 , К	x_1	5400	5000
Температура закалки продуктов синтеза, T_3 , К	x_2	2800	2300
Количество углеводорода (метана) от стехиометрически необходимого для получения ZrC , $\{CH_4\}$, %	x_3	130	100
Концентрация водорода в плазмообразующем газе $\{H_2\}$, % об.	x_4	5	2

При проведении экспериментов реализован полный факторный эксперимент 2^4 . В качестве параметра оптимизации процесса принято содержание в продуктах ZrC , ZrO_2 , $C_{своб.}$, N. Обработка результатов проводилась по схеме с равномерным дублированием опытов [14]. По критерию Кохрена (G_K) во всех экспериментах проверялась однородность дисперсий, далее рассчитывались оценки дисперсии выход-

ного параметра ($S_{\{y\}}^2$) и коэффициентов регрессии ($S_{\{b\}}^2$), определялись коэффициенты регрессии (b_0 , b_i , b_{ij}) и с помощью критерия Стьюдента оценивалась их значимость. Проверка адекватности полученных моделей проводилась с использованием критерия Фишера. Результаты расчетов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Основные параметры синтеза и характеристики карбида циркония

Table 5

Basic synthesis parameters and zirconium carbide characteristics

Параметр	Значение
Состав газа-теплоносителя, % об.:	
– азот	74,0;
– водород	2–5;
– природный газ (метан)	1,0
Крупность диоксида циркония, мкм	0,5–5,0
Количество карбидизатора (метана), % от стехиометрического	100–130
Начальная температура плазменного потока, К	5400
Температура закалки, К	2300–2800
Химический состав, %:	
– карбид циркония (ZrC)	94,12–93,61;
– диоксид циркония (ZrO_2)	4,56–5,27
– углерод свободный ($C_{своб.}$)	1,32–1,12;
– азот (N)	1,87–2,12
Форма частиц	Ограниченная



Значимость выходных параметров от условий синтеза описывается следующими уравнениями:

$$y[\text{ZrC}] = 83,97 + 7,42x_1 + 0,86x_2 - 1,03x_3; \quad (5)$$

$$y[\text{ZrO}_2] = 12,68 - 5,99x_1 - 0,59x_2; \quad (6)$$

$$y[\text{C}_{\text{своб.}}] = 3,28 - 1,37x_1 - 0,33x_2 + 0,85x_3 - 0,58x_{13} - 0,31x_{23}; \quad (7)$$

$$y[\text{N}] = 1,3 + 0,26x_1 + 0,16x_2. \quad (8)$$

Полученные уравнения позволяют количественно оценить влияние отдельных факторов на параметры оптимизации и управлять процессами синтеза. После перевода моделей от безразмерных координат к натуральным переменным получены следующие уравнения:

$$[\text{ZrC}] = -109,72 + 0,0371 T_0 + 0,0034 T_3 - 0,0687\{\text{CH}_4\}, \quad (9)$$

$$[\text{ZrO}_2] = 174,44 - 0,02995 T_0 - 0,00236 T_3, \quad (10)$$

$$[\text{C}_{\text{своб.}}] = -101,33 + 0,015 T_0 + 0,0079 T_3 + 1,2487\{\text{CH}_4\} - 0,00019 T_0\{\text{CH}_4\} - 0,00008 T_3\{\text{CH}_4\}, \quad (11)$$

$$[\text{N}] = -7,092 + 0,0013 T_0 + 0,00064 T_3. \quad (12)$$

В уравнениях (9)–(12): T_0 – начальная температура плазменного потока (5000–5400 K); $\{\text{H}_2\}$ – концентрация водорода в плазмообразующем газе (2–5% об. от объема плазмообразующего газа); $\{\text{CH}_4\}$ – количество восстановителя (100–130% от стехиометрически необходимого для получения ZrC)).

Анализ и обсуждение результатов. Содержание в продуктах синтеза карбида циркония является функцией трех факторов: начальной температуры плазменного потока x_1 , температуры закалки продуктов синтеза x_2 , содержание метана в шихте x_3 . Ранжирование факторов дает следующий ряд:

$$x_1 > x_2 > x_3 (T_0 > T_3 > \{\text{CH}_4\}).$$

На рис. 7 приведена зависимость содержания ZrC от начальной температуры плазменного потока и количества карбидизатора (метана).

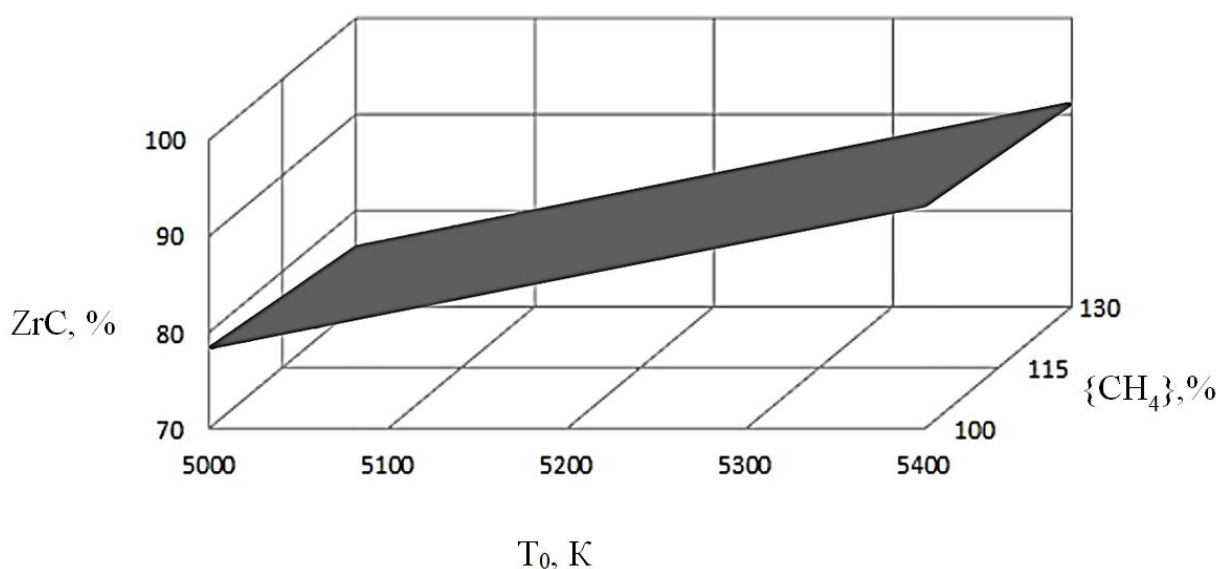


Рис. 7. Зависимость содержания ZrC в продуктах синтеза от начальной температуры плазменного потока и количества карбидизатора (метана) ($T_3=2800$)
Fig. 7. Dependence of ZrC content in synthesis products on initial temperature of plasma flow and amount of carbidizer (methane) ($T_3 = 2800$)



Содержание диоксида циркония в продуктах синтеза является функцией двух факторов: начальной температуры плазменного потока x_1 и температуры закалки продуктов синтеза x_2 . Ранжирование факторов дает следующий ряд:

$$x_2 > x_1 > (T_3 > T_0).$$

На рис. 8 приведена зависимость содержания диоксида циркония в продуктах синтеза от температуры закалки продуктов синтеза и начальной температуры плазменного потока.

Содержание свободного углерода в продуктах синтеза является функцией трех факторов – начальная температура плазменного потока x_1 , температура закалки продуктов синтеза x_2 и количество углеводорода (метана) от стехиометрически не-

обходимого x_3 , и двух двойных взаимодействий – x_{13} , x_{23} . Ранжирование факторов дает следующий ряд:

$$x_3 > x_2 > x_1 (\{CH_4\} > T_3 > T_0).$$

На рис. 9 приведена зависимость содержания свободного углерода в продуктах синтеза от температуры закалки продуктов синтеза и начальной температуры плазменного потока.

Содержание азота в продуктах синтеза является функцией двух факторов: начальной температуры плазменного потока x_1 и температуры закалки продуктов синтеза x_2 . Ранжирование факторов дает следующий ряд:

$$x_1 > x_2 (T_0 > T_3).$$

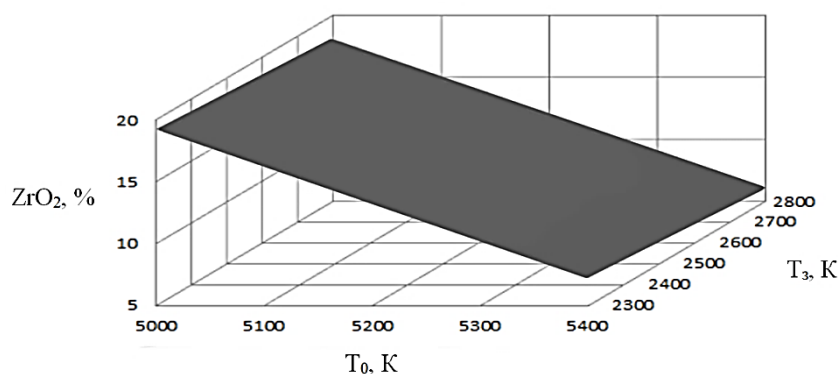


Рис. 8. Зависимость содержания ZrO_2 в продуктах синтеза от температуры закалки продуктов синтеза и начальной температуры плазменного потока ($\{CH_4\}=115\%$)
Fig. 8. Dependence of ZrO_2 content in synthesis products on quenching temperature of synthesis products and initial temperature of plasma flow ($\{CH_4\} = 115\%$)

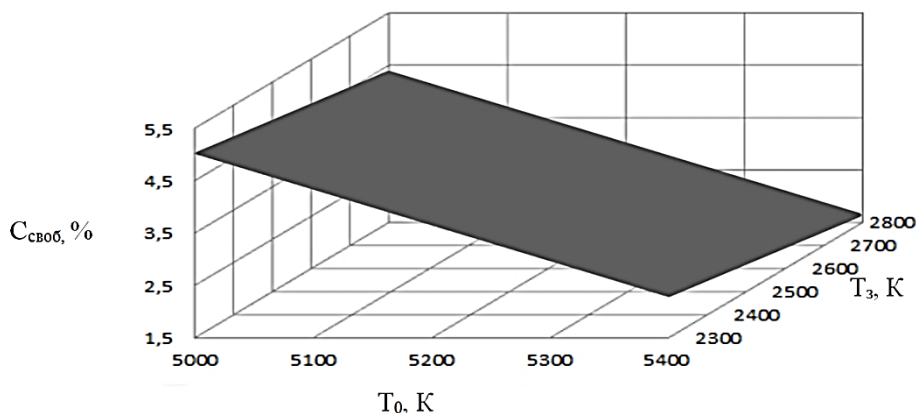


Рис. 9. Зависимость содержания свободного углерода в продуктах синтеза от температуры закалки продуктов синтеза и начальной температуры плазменного потока ($\{CH_4\}=115\%$)
Fig. 9. Dependence of free carbon content in synthesis products on quenching temperature of synthesis products and initial temperature of plasma flow ($\{CH_4\} = 115\%$)



На рис. 10 приведена зависимость содержания азота в продуктах синтеза от начальной температуры плазменного потока и температуры закалки продуктов синтеза.

Результаты электронно-микроскопического исследования продуктов карбида циркония представлены на рис. 11, где можно видеть, что просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ) при увеличении в 25000–30000 раз обеспечивает только констатацию наноуровня (рис. 11, а). Метод растровой электронной микроскопии (РЭМ) при увеличении в 220000 раз обеспечивает визуализацию отдельных частиц, возможность определения их размеров и формы, а также выявление соответствующей

щей карбиду примеси пиролитического, несвязанного в карбид углерода (рис. 11, б). Карбид циркония получен в виде ограниченных частиц кубической формы размерного диапазона от 10 до 40 нм. Ограниченная форма частиц карбида циркония свидетельствует об образовании их по механизму «пар–кристалл», предположительно при взаимодействии паров циркония и циана. Синтезированный карбид циркония по наноуровню и морфологии существенно отличается от его микропорошка, полученного механическим диспергированием карбида карботермического печного синтеза. Основные параметры синтеза и характеристики карбида циркония представлены в табл. 5.

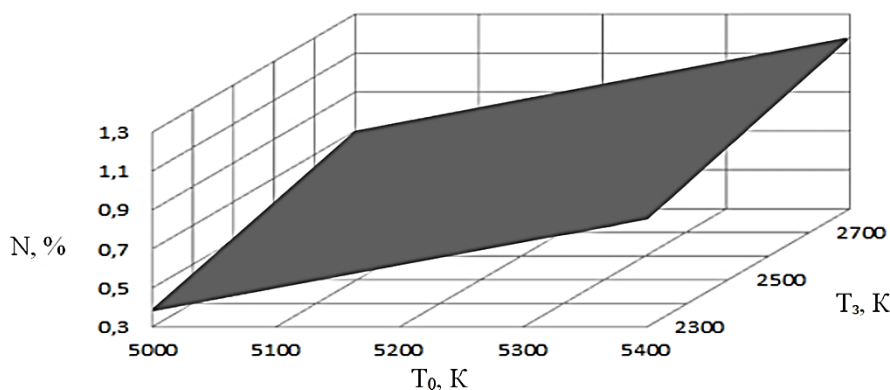


Рис. 10. Зависимость содержания азота в продуктах синтеза от начальной температуры плазменного потока и температуры закалки продуктов синтеза ($\{CH_4\}=115\%$)
Fig. 10. Dependence of nitrogen content in synthesis products on initial temperature of plasma flow and quenching temperature of synthesis products ($\{CH_4\}=115\%$)

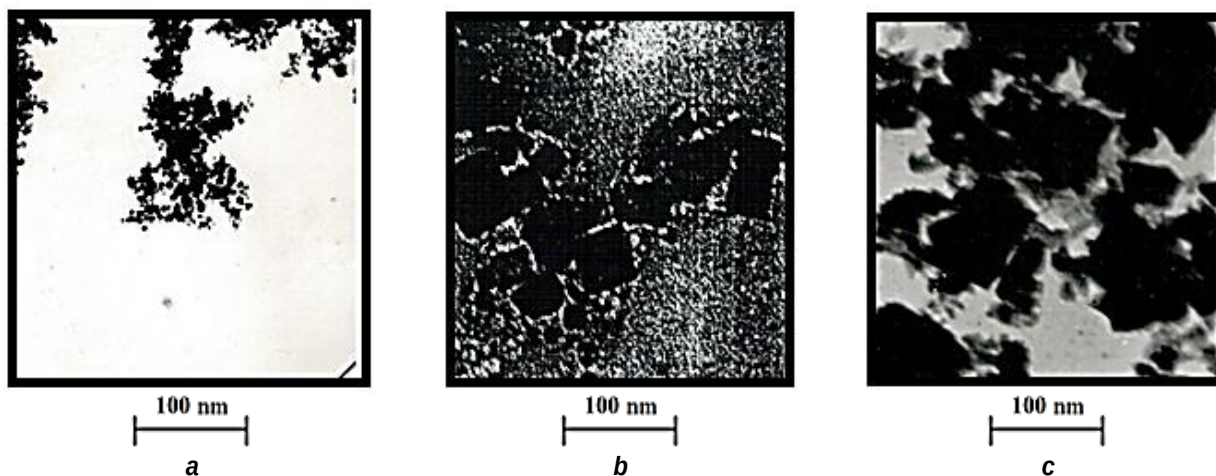


Рис. 11. Микрофотографии нано- (а, б) и кристаллического (с) карбида циркония
(а – ПЭМ; б – РЭМ; с – ПЭМ)
Fig. 11. Micrographs of nano (a, b) and crystalline (c) zirconium carbide
(a – TEM; b – REM; c – TEM)



Оптимальное сочетание технологических факторов для получения продуктов синтеза с максимальным содержанием карбида циркония соответствует начальной температуре плазмы 5400 К, стехиометрическому соотношению углеводорода и за-

калке карбида при 2800 К. В этих условиях получены порошки с содержанием, %: ZrC – 94,2–93,61; ZrO₂ – 4,56–5,27; C_{своб.} – 1,32–1,12; N – 1,87–2,12, что позволяет отказаться от дальнейшей оптимизации процесса.

Заключение

1. Проведен анализ современного состояния производства и применения карбида циркония. Подтверждено, что карбид циркония обладает уникальным сочетанием практически значимых свойств, многофункционален и способен работать в составе композиционных материалов и покрытий в экстремальных условиях. Установлено, что основу современного производства карбида циркония составляет карботермический способ. Стратегически важный нанокристаллический сегмент рынка полностью обеспечивается зарубежными поставщиками, что обуславливает необходимость развития российской нанотехнологии карбида циркония.

2. На основе моделирования высокотемпературных процессов пиролиза, газификации, карбидообразования, протекающих в системах C-H-N, Zr-C-H-N, Zr-C-O-H-N, для технологического варианта получения ZrC описаны закономерности изменения с температурой составов газообразных и конденсированных продуктов карбидообразования и прогнозированы условия образования ZrC в различных реакционных средах (соотношение компонентов, температура, состав газовой фазы, степень превращения цирконий-углеродсодержащего сырья в ZrC).

3. Научно обоснованы и экспериментально определены рациональные составы и дисперсность цирконий-углеродсодержащих шихт, составы и начальная температура газа-теплоносителя, температура закалки продуктов карбидообразования, обеспечивающие получение карбида

циркония с содержанием ZrC 93,61–94,12%. Для исследуемых технологических вариантов получены уравнения, описывающие зависимости содержания ZrC от основных технологических факторов: соотношения реагентов, состава газа-теплоносителя, температур.

4. Определены физико-химические характеристики карбида циркония в наноразмерном состоянии: кристаллическая структура, фазовые и химические составы, дисперсность, морфология, окисленность, термоокислительная устойчивость.

5. Разработан на основе интерпретации результатов теоретических и экспериментальных исследований непрерывный технологический процесс получения карбида циркония в плазмохимическом реакторе, включающий плазмогенерацию, плазмообработку цирконий-углеродсодержащего сырья, образование ZrC, принудительное охлаждение и выделение его из потока отходящих от реактора технологических газов.

6. Проведено в производственных условиях ООО «Полимет» в плазмохимическом трехструйном вертикальном прямоточном реакторе мощностью 150 кВт опробование и подтверждение достоверности технологических режимов получения карбида циркония.

7. Спрогнозирована на основе сформированных представлений об особенностях физико-химических свойств нанокристаллического карбида циркония возможность применения его в функциональных защитных покрытиях.



Библиографический список

1. Косолапова Т.Я. Карбиды. М.: Металлургия, 1968. 300 с.
2. Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В. Физико-химические свойства карбида циркония: анализ, систематизация, оценка прикладной значимости // Вестник горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2016. Вып. 36. С. 136–143.
3. Serlire M., Oye H.A. Cathodes in Aluminium Electrolysis // Dusseldorf: Aluminium – Verlag, 2010. 698 p.
4. Yutai Katoh, Gokul Vasudevamurthy, Takashi Nozawa, Lance L. Snead Properties of zirconium carbide for nuclear fuel applications // Journal of Nuclear Materials. 2013. Vol. 4419 (1–3). P. 718–742.
5. Алексеева Т.И., Галевский Г.В., Руднева В.В., Галевский С.Г. Технологические решения в производстве карбида циркония: анализ, оценка состояния и перспектив // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2017. Т. 23. № 1. С. 256–270. DOI: 10.18721/JEST.230126.
6. Xiang J.Y., Liu S.C., Hua W.T., Zhang Y., Chen C.K., Wang P., He J.L., Yu D.L., Xu B., Lu Y.F., Tian Y.J., Liu Z.Y. Mechanochemically activated synthesis of zirconium carbide nanoparticles at room temperature: A simple route to prepare nanoparticles of transition metal carbides // Journal of the European Ceramic Society. 2011. Vol. 31 (8). P. 1491–1496.
7. Kuvshinov G.G., Ermakova M. A. and Ermakov D.Yu. Morphology and Texture of Silica Prepared by Sol–Gel Synthesis on the Surface of Fibrous Carbon Materials. Novosibirsk: Boreskov Institute of Catalysis, 2002. 432 p.
8. Jingjing Xie, Zhengyi Fu, Yucheng Wang, Soo Wahn Lee, Koichi Niihara Synthesis of nanosized zirconium carbide powders by a combinational method of sol–gel and pulse current heating // Journal of the European Ceramic Society. 2014. Vol. 34 (1). P. 13.e1–13.e7.
9. Liliang Chen, Chihiro Iwamoto, Emil Omurzak, Shintaro Takebe, Hiroki Okudera, Akira Yoshiasa, Saadat Sulaimankulovaf, Tsutomu Mashimo Synthesis of zirconium carbide (ZrC) nanoparticles covered with graphitic “windows” by pulsed plasma in liquid // RSC Advances. 2011. Vol. 1. P. 1083–1088.
10. Dan Zhao, Changrui Zhan, Haifeng Hu, Yudi Zhang Preparation and characterization of three-dimensional carbon fiber reinforced zirconium carbide composite by precursor infiltration and pyrolysis process // Ceramics International. 2011. Vol. 37 (7). P. 2089–2093.
11. Medri V., Monteverde F., Balbo A., Bellosi A. Comparison of ZrB₂-ZrC-SiC Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering and Hot-Pressing // Advanced Engineering Materials. 2005. Vol. 7 (3). P. 159–163.
12. Алексеева Т.И. Анализ российского и мирового рынка нанокристаллического карбида циркония // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения: труды Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых (Новокузнецк, 16–18 мая 2017 г.). Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2017. Вып. 21. Ч. 2: Естественные и технические науки. С. 265–267.
13. Хартманн У. Очарование нанотехнологии / пер. с нем. Т.Н. Захаровой; под ред. Л.Н. Патрикеева. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 173 с.
14. Рудской А.И. Нанотехнологии в металлургии. СПб.: Наука, 2007. 186 с.
15. Ефимова К.А., Галевский Г.В., Руднева В.В., Алексеева Т.И. Реактор для обработки и производства тугоплавких материалов: теплотехнические, ресурсные и технологические характеристики // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену: тезисы докладов сообщений (Минск, 23–26 июня 2016 г.). Минск: Изд-во Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Белоруси, 2016. Т. 3. С. 72–76.
16. Центр коллективного пользования «Материаловедение и металлургия» [Электронный ресурс] / Официальный сайт НИТУ МИСиС. URL: <http://misis.ru/science/naucnyj-kompleks/naucnye-laboratorii-i-centry/centr-kollektivnogo-polzovaniy> (22.06.2016).

References

1. Kosolapova T.Ya. *Karbidy* [Carbides]. Moscow: Metallurgy Publ., 1968, 300 p. (In Russian).
2. Alekseeva T.I., Galevskii G.V., Rudneva V.V. Physico-chemical properties of zirconium carbide: analysis, systematization, evaluation of applied significance. *Vestnik gorno-metallurgicheskoi sekti RAEN. Otdelenie metallurgii* [Bulletin of Mining and Metallurgical Section of the Russian Academy of Natural Sciences. Metallurgy Department]. 2016, issue 36, pp. 136–143. (In Russian).
3. Serlire M., Oye H.A. Cathodes in Aluminium Electrolysis. Dusseldorf: Aluminium – Verlag, 2010, 698 p.
4. Yutai Katoh, Gokul Vasudevamurthy, Takashi Nozawa, Lance L. Snead Properties of zirconium carbide for nuclear fuel applications. *Journal of Nuclear Materials*. 2013, vol. 4419 (1–3), pp. 718–742.
5. Alekseeva T.I., Galevskii G.V., Rudneva V.V., Galevskii S.G. Technological solutions in production of zirconium carbide: analysis, evaluation of state and prospects. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU* [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology]. 2017, vol. 23, no. 1, pp. 256–270. <https://doi.org/10.18721/JEST.230126>. (In Russian).
6. Xiang J.Y., Liu S.C., Hua W.T., Zhang Y., Chen C.K., Wang P., He J.L., Yu D.L., Xu B., Lu Y.F., Tian Y.J., Liu Z.Y. Mechanochemically activated synthesis of zirconium carbide nanoparticles at room temperature: A simple route to prepare nanoparticles of transition metal carbides. *Journal of the European Ceramic Society*.



2011, vol. 31 (8), pp. 1491–1496.

7. Kuvshinov G.G., Ermakova M. A. and Ermakov D.Yu. Morphology and Texture of Silica Prepared by Sol–Gel Synthesis on the Surface of Fibrous Carbon Materials. Novosibirsk: Boreskov Institute of Catalysis, 2002, 432 p.

8. Jingjing Xie, Zhengyi Fu, Yucheng Wang, Soo Wahn Lee, Koichi Niihara Synthesis of nanosized zirconium carbide powders by a combinational method of sol–gel and pulse current heating. Journal of the European Ceramic Society. 2014, vol. 34 (1), pp. 13.e1–13.e7.

9. Liliang Chen, Chihiro Iwamoto, Emil Omurzak, Shintaro Takebe, Hiroki Okudera, Akira Yoshiasa, Saadat Sulaimankulovaf, Tsutomu Mashimo Synthesis of zirconium carbide (ZrC) nanoparticles covered with graphitic “windows” by pulsed plasma in liquid. RSC Advances. 2011, vol. 1, pp. 1083–1088.

10. Dan Zhao, Changrui Zhan, Haifeng Hu, Yudi Zhang Preparation and characterization of three-dimensional carbon fiber reinforced zirconium carbide composite by precursor infiltration and pyrolysis process. Ceramics International. 2011, vol. 37 (7), pp. 2089–2093.

11. Medri V., Monteverde F., Balbo A., Bellosi A. Comparison of ZrB₂-ZrC-SiC Composites Fabricated by Spark Plasma Sintering and Hot-Pressing. Advanced Engineering Materials. 2005, vol. 7 (3), pp. 159–163.

12. Alekseeva T.I. *Analiz rossiiskogo i mirovogo rynka nanokristallicheskogo karbida tsirkoniya* [Analysis of Russian and world market of nanocrystalline zirconium carbide]. *Trudy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh “Nauka i molodez: problemy, poiski, resheniya”* [Proceedings of the

All-Russian Scientific Conference of Students, Post-graduates and Young Scientists “Science and Youth: Problems, Searches, Solutions”]. Novokuznetsk: SibGIU Publ., 2017, issue 21, part 2. Natural and technical sciences. P. 265–267. (In Russian).

13. Khartmann U. *Ocharovanie nanotekhnologii* [Charm of nanotechnology]. Moscow: BINOM. Laboratory of Knowledge Publ., 2008, 173 p.

14. Rudskoi A.I. *Nanotekhnologii v metallurgii* [Nanotechnologies in metallurgy]. SPb.: Nauka Publ., 2007, 186 p. (In Russian).

15. Efimova K.A., Galevskii G.V., Rudneva V.V., Alekseeva T.I. *Reaktor dlya obrabotki i proizvodstva tugoplavkikh materialov: teplotekhnicheskie, resursnye i tekhnologicheskie kharakteristiki* [Reactor for processing and production of refractory materials: heat engineering, resource and technological characteristics]. Tezisy dokladov i soobshchenii XV Minskogo mezhdunarodnogo foruma po teplo- i massoobmenu [Abstracts of reports at XV Minsk International Heat and Mass Transfer Forum]. Minsk: A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 2016, vol. 3, pp. 72–76.

16. *Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya “Materialovedenie i metallurgiya”* [Multiple Access Center “Material Science and Metallurgy”]. *Ofitsial'nyi sait NITU MISiS* [Official site of MISiS National University of Science and Technology]. Available at:

<http://misis.ru/science/naucnyj-kompleks/naucnye-laboratorii-i-centry/centr-kollektivnogo-polzovaniya> (accessed 22 June 2016).

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 669.713.7;669:504

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-181-192>

СОВРЕМЕННАЯ РЕСУРСОБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ АНОДНОЙ МАССЫ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

© О.И. Дошлов¹, К.И. Чижик², И.О. Дошлов³, Т.А. Подгорбунская⁴, Р.С. Афанасьева⁵

^{1,3,4,5}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

²Московский государственный строительный университет,
129337, Российская Федерация, г. Москва, Ярославское шоссе, 26.

РЕЗЮМЕ. Интенсификация процессов получения алюминия электролизом криолит-глиноземных расплавов требует постоянного обновления и качества применяемых сырьевых компонентов. Впервые в мировой практике в цветной металлургии применен экологичный нефтяной пек, полученный каталитическим жидкофазным окислительным крекингом. Преимуществом данного вида пека по сравнению с традиционным использованием каменноугольных пеков является полное отсутствие источника канцерогенов 3,4-бенз[а]пирена в этом связующем. Кроме того, также была применена в качестве связующего для анодной массы модифицированная тяжелая смола пиролиза с повышенным коксовым числом до 25 единиц. **ЦЕЛЬЮ** данного исследования является создание новых углеродных композиций на основе нефтяного пека с минимальным содержанием канцерогенных веществ по сравнению с традиционным применением каменноугольного в производстве алюминия электролизом криолит-глиноземных расплавов. **МЕТОДЫ.** В статье впервые представлены результаты исследования нефтяного пека, полученного методом каталитического жидкофазного окислительного крекинга, в его составе не обнаружены бенз[а]пирены (образцы исследовались методом хромато-масс-спектрометрии). **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Приведены результаты испытаний экологически чистого нефтяного пека, полученного по технологии каталитического жидкофазного окислительного крекинга, и модифицированной тяжелой смолы пиролиза с возможностью их практического использования для современной ресурсосберегающей технологии в цветной металлургии при получении «сухой» анодной массы. **ВЫВОДЫ.** Проведенные исследования показывают высокую экологическую и экономическую эффективность использования нефтяных пеков и модифицированной тяжелой смолы пиролиза в качестве связующих компонентов при производстве «сухой» анодной массы для получения первичного алюминия на ваннах с анодом Содерберга.

Ключевые слова: ресурсосберегающая технология получения алюминия, нефтяной экологический электродный пек, модифицированная тяжелая смола пиролиза, содержание серы в пеке, коксовое число, температура размягчения.

Информация о статье. Дата поступления 20 января 2018 г.; дата принятия к печати 20 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Дошлов О.И., Чижик К.И., Дошлов И.О., Подгорбунская Т.А., Афанасьева Р.С. Современная ресурсосберегающая технология получения анодной массы в металлургическом производстве // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 181–192. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-181-192

¹Дошлов Олег Иванович, кандидат химических наук, профессор кафедры химической технологии, e-mail: doshlov125@mail.ru

Oleg I. Doshlov, Candidate of chemical sciences, Professor of the Department of Chemical Engineering, e-mail: doshlov125@mail.ru

²Чижик Константин Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры водоснабжения и водоотведения, e-mail: irkyt-44@yandex.ru

Konstantin I. Chizhik, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Water Supply and Sanitation, e-mail: irkyt-44@yandex.ru

³Дошлов Иван Олегович, аспирант, e-mail: doshlov125@mail.ru

Ivan O. Doshlov, Postgraduate student, e-mail: doshlov125@mail.ru

⁴Подгорбунская Татьяна Анатольевна, кандидат химических наук, доцент кафедры химической технологии, e-mail: tpodgor@istu.edu

Tatiana A. Podgorbunskaia, Candidate of chemical sciences, Associate Professor of the Department of Chemical Engineering, e-mail: tpodgor@istu.edu

⁵Афанасьева Руслана Сергеевна, бакалавр, e-mail: rusl2708@mail.ru

Ruslana S. Afanasieva, Bachelor, e-mail: rusl2708@mail.ru



MODERN RESOURCE-SAVING TECHNOLOGY TO PRODUCE ANODE MASS IN METALLURGICAL INDUSTRY

O.I. Doshlov, K.I. Chizhik, I.O. Doshlov, T.A. Podgorbunskaya, R.S. Afanasieva

Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
Moscow State University of Civil Engineering,
26, Yaroslavskoe Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

ABSTRACT. Intensification of aluminum production by the electrolysis of cryolite-alumina melts requires constant updating and high quality of applied raw materials. For the first time in the world practice environmentally friendly oil pitch obtained by liquid-phase catalytic oxidative cracking has been used in non-ferrous metallurgy. As compared with the traditional use of coal-tar pitch its advantage is complete absence of the source of carcinogens 3,4 Benz[a]pyrene in this binder. A modified heavy pyrolysis tar with the increased coke number of up to 25 units has been also used as a binder for the anode mass. The **PURPOSE** of this study is development of new carbon compositions based on oil pitch containing minimum of carcinogenic substances as compared with the traditional use of coal-tar pitch in aluminum production by the electrolysis of cryolite-alumina melts. **METHODS.** For the first time ever the article presents the results of studying petroleum tar obtained by the catalytic liquid phase oxidative cracking. The results of the chromato-mass-spectrometry of the samples of the produced tar did not show the presence of benzo[a]pyrene in tar composition. **RESULTS.** The paper provides the results of testing environmentally friendly petroleum tar obtained by the catalytic liquid-phase oxidative cracking technology and modified heavy pyrolysis tar with the possibility of their practical use for modern resource-saving technology in non-ferrous metallurgy in the production of dry anode mass. **CONCLUSIONS.** Conducted studies show high ecological and economic efficiency of using petroleum tar and modified heavy pyrolysis tar as binding components when producing dry anode mass to obtain primary aluminum in reduction cells with Soderberg anode.

Keywords: resource-saving technology of aluminum production, environmentally friendly petroleum electrode tar, modified heavy pyrolysis tar, sulfur content in the pitch, coke number, softening temperature

Information about the article. Received January 20, 2018; accepted for publication June 20, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Doshlov O.I., Chizhik K.I., Doshlov I.O., Podgorbunskaya T.A., Afanasieva R.S. Modern resource-saving technology to produce anode mass in metallurgical industry. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 7, pp. 181–192. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-181-192 (in Russian).

Введение

В условиях глобализации российской экономики происходит формирование техногенной нагрузки на окружающую среду, большая часть при этом приходится на базовую отрасль промышленности – цветную и черную металлургию. Сокращая вред, наносимый окружающей среде деятельностью промышленных предприятий, необходимо в ближайшее время снизить экологическую нагрузку. Для этого, во-первых, необходимо провести оценку фактического состояния экосистемы, во-вторых, определить способы уменьшения негативного воздействия строительством новых или реконструкцией действующих производств с учетом актуальных нормативных документов и современных эко- и ресурсосберегающих технологий.

Одним из крупнейших производителей и экспортеров алюминия в мире явля-

ется Россия [1]. Технологии, применяемые в настоящее время во всем мире для получения алюминия-сырца, приводят к негативному воздействию на окружающую среду. Массовое складирование отходов производства на полигонах и шламохранилищах приводит к заражению почв, выбросы газообразных токсичных веществ, в частности, перфторуглеродов – к загрязнению атмосферы, а несовершенные технологии очистки сточных вод – к попаданию с ними вредных веществ в естественные водоемы.

В результате вхождения России в мировую экономику увеличиваются мощности производства первичного алюминия и, как следствие, возрастают требования экологической безопасности, что на сегодняшний день является актуальным. Поэтому компании алюминиевой промышленности во всем мире непрерывно тратят колос-



сальные средства на проведение мероприятий по снижению неблагоприятного воздействия выбросов на окружающую среду [2–5].

Алюминиевые компании и предприятия, использующие для электролиза ванны с анодом Содерберга, например, такие как Ейдехаун, Ардал, Санндал, Мосжен, Хоянгер, Тисседал, большей экологичности производства и ресурсосбережения (затраты на производство анодов, расход электроэнергии и др.) достигают путем использования «сухой» анодной массы на основе каменноугольных пеков с высокой температурой размягчения (пеки марки «В» по межгосударственному ГОСТ 10200-2017)⁶. На свойства анода значительное влияние оказывает связующее в анодной массе, в основном на электропроводные свойства, окисление, механическую прочность, разрушаемость и удельный расход анодной массы на получение 1 т алюминия [6]. Чтобы улучшить свойства связующего и обеспечить создание конгломерата пеко-коксовой композиции в результате спекания, широко применяют совмещение гибридных пеков с термореактивными смолами (например, многопрофильная интернациональная химическая компания «Ashland»).

Сырьем для изготовления анодной массы и обожженных анодов служат электродные каменноугольные пеки (или пеки гибридного состава) и электродные коксы (пековый или нефтяной). Сложной задачей производства сухой анодной массы является оптимальный выбор исходных материалов. Состав и свойства получаемых пеков и коксов зависят от сырья, из которого их получают (каменный уголь, остатки нефтепереработки). Каменноугольные пеки

состоят из полициклических ароматических углеводородов и смолистых веществ, что является основным недостатком. В «Российском регистре потенциально опасных химических и биологических веществ» в категорию чрезвычайно опасных определены три типа ароматических углеводородов: бензапирен, бензоантрацен и дибензантрацен. Указателем канцерогенного риска является бензапирен, его допустимая концентрация в атмосфере не может превышать 10^{-9} г/м³ [6]^{6,7}.

Для получения более экологичного композиционного сырья – пека – необходимо создание новых рецептур, которые удовлетворяли бы сегодняшним требованиям.

Получение композиционного сырья нового поколения на основе смесей высокотемпературного каменноугольного пека и тяжелой смолы пиролиза (ТСП) является одним из путей улучшения свойств связующих компонентов при производстве сухой анодной массы [6].

Термический пиролиз углеводородного сырья – это основной способ получения низкомолекулярных олефинов – этилена и пропилена. Вместе с газообразными углеводородами получают побочный продукт – тяжелую смолу пиролиза (ТСП), фракцию с температурой кипения более 200°C, которую выделяют при ступенчатой конденсации парогазовой смеси продуктов пиролиза. ТСП представляет собой смесь полиароматических конденсированных углеводородов, количество циклов в которых – от двух и более. Выход ТСП зависит от фракционного состава исходного сырья и технологических параметров⁸ [7, 8].

Для получения нового гибридного связующего в лабораторных условиях была испытана добавка ТСП к сухой анодной

⁶Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. 7-е изд., перераб. и доп. В 3 т. Т. 1. Органические вещества / под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. Л.: Химия, 1976. 592 с. / Hazardous substances in industry: handbook for chemists, engineers and doctors, in three volumes. Vol. 1. Organic substances / under edition of N.V. Lazarev, E.N. Levina. L.: Chemistry Publ., 1976, 592 p.

⁷Вредные вещества в промышленности: справочник для химиков, инженеров и врачей. 7-е изд., перераб. и доп. В 3 т. Т. 2. Органические вещества / под ред. Н.В. Лазарева, Э.Н. Левиной. Л.: Химия, 1976. 314 с. / Hazardous substances in industry: handbook for chemists, engineers and doctors, in three volumes. Vol. 2. Organic substances / under edition of N.V. Lazarev, E.N. Levina. L.: Chemistry Publ., 1976, 314 p.

⁸Капустин В.М., Гуреев А.А. Технология переработки нефти. В 2 ч. Ч. 2. Деструктивные процессы. М.: КолосС, 2007. 334 с. / Kapustin V.M., Gureev A.A. Technology of oil refining. In 2 parts. Part two. Destructive processes. Moscow: KolosS Publ., 2007, 334 p.



массе. При оценке свойств полученного связующего и определения качества сухой анодной массы были приготовлены 4 партии анодной массы, в которых изменяли соотношение ТСП и коксовой шихты (1–10%) при постоянных ее количествах и температуре смешения [6].

На первом этапе лабораторных исследований были выделены представительные образцы исходных пековых материалов, нефтяного прокаленного кокса (крупка 1, крупка 2, отсев, пылевая фракция), которые прошли обычную подготовку в промышленных условиях.

В качестве кокса-наполнителя использовали сортовые коксовые материалы электродного нефтяного кокса, полученные на Ангарском НПЗ (АО «АНХК» ПАО «Роснефть») и выбранные в цехе анодной массы ПАО «РУСАЛ Братск».

Исследование качества исходных компонентов (коксовой шихты, каменноугольного пека) проводили по методам, отвечающим требованиям ТУ 0258-003-00149452-96⁹, в соответствии с действующими государственными стандартами. Помимо тестированных данных дополнительно измеряли по ГОСТ Р ИСО 6998-2017¹⁰ коксовый остаток, полученный в двух тиглях при температуре 550°C. Действительную плотность определяли методом пикнометрии в смеси дистиллированной воды и этилового спирта (1:1) при температуре 20°C согласно ГОСТ 2160-2015¹¹. Содержание натрия определяли методом пламенной фотометрии на пламенном фотометре PFP-7.

Свойства основных фракций коксовых материалов приведены в табл. 1 и 2. В качестве связующего применяли каменноугольный пек марки «В» (табл. 3).

Таблица 1

Свойства коксовых материалов

Table 1

Properties of coke materials

Показатель	Значение			
	Крупка 1	Крупка 2	Отсев	Пыль
Зольность, %	0,12	0,14	0,19	0,34
Действительная плотность, г/см ³	2,05	2,04	2,05	2,04
Удельное электросопротивление, мкОм·м	537	539	530	–
Содержание серы, %	1,57	1,55	1,45	1,46
Содержание натрия, %	0,017	0,016	0,017	0,015
Содержание примесей в золе кокса, %:				
железо	0,02	0,02	0,02	0,04
кремний	0,08	0,01	0,004	0,02
ванадий	0,04	0,02	0,02	0,03

Таблица 2

Ситовый состав коксовых материалов

⁹ ТУ 0258-003-00149452-96. Технические условия «Кокс электродный прокаленный в камерных печах» с изм. № 1–4 / TU 0258-003-00149452-96. Specifications "Electrode coke calcined in batch furnaces" with alterations. No. 1–4

¹⁰ ГОСТ Р ИСО 6998-2017. Материалы углеродные для производства алюминия. Пек для электродов. Определение коксового числа / Carbonaceous materials for aluminium production. Pitch for electrodes. Determination of coke number.

¹¹ ГОСТ 2160-2015. Топливо твердое минеральное. Определение действительной и кажущейся плотности / GOST 2160-2015. Solid mineral fuel. Determination of actual and apparent density



Table 2

Sieve composition of coke materials

Ситовый состав, мм	Значение, мм			
	Крупка 1	Крупка 2	Отсев	Пыль
+6	0,5	–	–	–
-6+4	85,0	0,3	–	–
-4+2	14,0	87,5	1,0	–
-2+0,08	0,5	12,2	98,5	–
-0,08	–	0,2	0,5	–
+0,16	–	–	–	5,0
-0,16+0,08	–	–	–	20,0
-0,08	–	–	–	75,0
в т.ч. -0,05	–	–	–	53,0

Вязкость пека определяли на вискозиметре BROOKFIELD THERMOSEL марки DV-II⁺ PRO по ГОСТ 32271-2013¹², который идентичен стандарту ASTM D-4402-06. Качественный и количественный состав нефтяного пека определяли методом

хромато-масс-спектрометрии на приборе GCMS-QP2010 SE.

Свойства тяжелой смолы пиролиза АО «Ангарский завод полимеров» ПАО «Роснефть» приведены в табл. 4.

Таблица 3

Физико-химические свойства пека марки «В»

Table 3

Physico-chemical properties of mark “B” pitch

Показатель	Пек марки «В»
Температура размягчения, °С	90,5
Выход летучих, %	51,56
Зольность, %	0,15
Групповой состав, %:	
α-фракция	36,6
α ₁ -фракция	11,5
β-фракция	31,0
γ-фракция	32,4
Коксовый остаток, %	59,1
Действительная плотность, г/см ³	1,3304
Содержание натрия, %	0,0041
Содержание серы, %	0,58
Вязкость, Па·с, при температуре, °С:	
140	41017
160	5178
180	967
200	276
220	74,0

¹² ГОСТ 32271-2013. Битумы нефтяные. Определение вязкости при повышенных температурах на ротационном вискозиметре / GOST 32271-2013. Oil bitumens. Viscosity determination at elevated temperatures on a rotational viscometer.



Таблица 4

Характеристика тяжелой смолы пиролиза марки «А»

Table 4

Characteristic of heavy pyrolysis tar of mark "A"

Показатель	Значение
Плотность при 20°C, г/см ³	не менее 1,04
Вязкость кинематическая при 100°C, мм ² /с	не более 25
Температура отгона 3%-го объема, °C	не менее 180
Коксуемость, %	не более 12
Массовая доля серы, %	не более 0,3
Массовая доля воды, %	не более 0,3
Массовая доля механических примесей, %	не более 0,01
Индекс корреляции	не менее 125
Массовая доля ионов натрия, %	не более 0,005
Массовая доля ионов калия, %	не более 0,0005

В состав ТСП входит большое количество полициклических ароматических и непредельных углеводородов, вступающих в реакции поликонденсации и уплотнения и приводящих к получению продуктов с хорошими связующими и спекающими свойствами [8–10].

Еще одним достоинством ТСП является низкое содержание серы, что определяет вероятность получения композиционных углеродных материалов с малым содержанием серы из смолы пиролиза. Это имеет большое значение в технологии производства (прирост работы установки замедленного коксования в необогреваемых камерах без остановок на ремонт) и экологической ситуации в цехе электролитического получения алюминия [6].

Образцы приготавливали в лабораторных условиях в смесителе с подогревом, снабженном мешалкой с Z-образными лопастями, температура смешивания составляла 180°C. Количество связующего искали подбором, чтобы получить «сухую» анодную массу с коэффициентом текучести 1,2–1,3. В образцах с добавкой смолы пиролиза часть связующего уменьшали соответственно количеству смолы пиролиза. Полученный образец коксовой шихты нагревали в смесителе, а пек – в сушильном шкафу до температуры смешивания. Затем наливали требуемое количество смолы пиролиза в смеситель и усредняли в

течение 2 мин, после чего добавляли пек в необходимом количестве. Перемешивали в течение 40 мин. Технологическое опробование и обжиг анодной массы выполняли согласно ТУ 48-5-80-86. Работу проводили таким образом, чтобы максимально уменьшить влияние свойств кокса-наполнителя, гранулометрического состава коксовой шихты и технологии приготовления анодной массы на качественные характеристики готовой массы. Тем самым создавались условия для полного раскрытия действия смолы пиролиза на характеристики анодной массы.

В качестве образца-свидетеля использовали полученный из тех же углеводородных материалов и таким же гранулометрическим составом пример сухой анодной массы без добавки смолы пиролиза.

Для объяснения действия добавки смолы пиролиза на протекание химических изменений пека при воздействии температуры следует применить понятия, в рамках которых на данный момент принимается во внимание сольватация между дисперсной фазой и дисперсионной средой насыщенных полимерных структур в коллоидной и физической химии [11]. Физико-химические свойства полученной анодной массы представлены в табл. 5.

При проведении технологического опробования образцов анодной массы бы-



ло использовано следующее оборудование:

- цилиндрические кожухи диаметром 50–55 мм, высотой 400 мм с днищами, имеющими отверстия для выхода газов диаметрами 5–8 мм (кожухи изготовлены из листового железа толщиной 0,5–0,75 мм);
- электропечь шахтовая или криптоновая с глубиной шахты 350–400 мм;
- стакан из нержавеющей или жаропрочной стали для установки образцов в шахтную печь с внутренними размерами 310×180×130 мм и толщиной стенки 8 мм;
- термоэлектрический термометр (термопара) типа ТХА с градуировкой ХА68;
- регистрирующий прибор ДИСК-250 с диапазоном измерения температуры 0–1100°C;
- трамбовка с диаметром основания 45 мм;
- сушильный шкаф типа СНОЛ-3,5/3-М2 с номинальной рабочей температурой 350°C и точностью автоматического

регулирования $\pm 5^\circ\text{C}$ или другой аналогичный шкаф, обеспечивающий нагрев до температуры 130–140°C;

- обогреватель электрический;
- вспомогательный инвентарь (противни для нагрева массы, шпатель и др.).

В процессе исследования физико-механических свойств образцов анодной массы в порядке очередности определяли удельное электросопротивление, кажущуюся плотность, предел прочности на сжатие, пористость. Для определения удельного электросопротивления образец длиной $85 \pm 0,1$ мм и диаметром $36 \pm 0,1$ мм надежно зажимали с торцов на прессе токоподводящими пластинами и пропускали по нему ток силой 5 А. Снятие падения напряжения производили с помощью потенциальных зондов, расстояние между которыми постоянно и равно 45 мм. Измерение падения напряжения производили в трех точках боковой поверхности при одном зажатии образца.

Таблица 5

Физико-химические свойства сухой анодной массы

Table 5

Physico-chemical properties of dry anode mass

Содержание смолы пиролиза, %	Содержание связующего, %	K_T , %	Удельное электросопротивление, мкОм·м	Кажущаяся плотность г/см^3	Предел прочности на сжатие, МПа	Реакционная способность в токе CO_2 , мг/см·ч	Пористость, %
–	26	1,40	71,0	1,52	38,4	43,6	24,49
1	25,74	1,59	74,52	1,48	35,6	43,3	26,65
5	24,7	1,39	76,61	1,48	28,7	39,5	26,85
10	23,4	1,66	70,37	1,48	23,0	37,0	26,68

Удельное сопротивление R , мкОм·м, рассчитали по формуле

$$R = \frac{e \cdot S \cdot 10^6}{I \cdot L},$$

где e – показания милливольтметра, В; S – площадь поперечного сечения, м^2 ; I – сила тока, А; L – длина участка проводника, расстояние между потенциальными зондами, м.



Удельное электросопротивление определяли как среднее арифметическое значений из всех определений.

Кажущуюся плотность определяли по соотношению массы и объема цилиндра, изготовленного из образца анодной массы. Для выполнения анализа применяли:

– весы лабораторные технические ВЛКТ-500М по ГОСТ 24104-2001, наибольший предел взвешивания – 500 г, цена деления – 10 мг, погрешность при наибольшем пределе взвешивания – ± 20 мг;

– штангенциркуль типа ШЦ-1, ГОСТ 166-89, предел измерений – от 0 до 125 мм, значение отсчета по нониусу – 0,1 мм.

Кажущуюся плотность d_k , г/см³, рассчитали по формуле

$$d_k = \frac{m}{V},$$

где m – масса цилиндра, г; V – объем цилиндра, см³.

Расчет кажущейся плотности произвели с точностью до 0,01 г/см³. Величину кажущейся плотности нашли как среднее арифметическое не менее чем двух определений.

Пористость Π , %, установили расчетом по формуле

$$\Pi = \frac{d_i - d_k}{d_i} \times 100.$$

Образцы анодной массы испытывали на прочность путем определения предела прочности на сжатие. Метод заключается в определении максимального напряжения в момент разрушения образца. Для этих целей использовали универсальные испытательные машины, обеспечивающие максимальную нагрузку не менее 100 кН с погрешностью измерения не более $\pm 1\%$.

Предел прочности на сжатие G , МПа, рассчитали по формуле:

$$G = \frac{P}{S} \times 10,$$

где P – разрушающее усилие, кН; S – площадь сечения образца, см².

Прочность на сжатие определяли как среднее арифметическое значение из всех произведенных определений, но не менее двух.

Текущность определяли по степени изменения поперечного сечения образца цилиндрической формы после его нагрева до 170°C в течение 30 мин и устанавливали как отношение диаметра нижнего основания измененного образца к его исходному диаметру.

Полученные результаты исследований анодной массы указывают на то, что для достижения лучших показателей анодной массы на основе смеси пека и смолы пиролиза обуславливает меньшее, на 1,0–1,5%, количество связующего. Это объясняется невысокой вязкостью смеси каменноугольного пека и смолы пиролиза, что является причиной закономерного увеличения коэффициента текущести до 1,4–1,66.

В общем случае пористость любого углеродонаполненного, карбонизированного материала должна включать объем пор наполнителя, незаполненных связующим. Объем пор карбонизированного связующего и объем пор макро- и микротрещин, образующихся на границе наполнителя – кокса и связующего – зависит в основном от усадки последнего и термического расширения наполнителя в процессе обжига. Поскольку чистый пек отличается более высокой вязкостью по сравнению со смесью смолы пиролиза и пека, вероятность наличия незаполненных связующим пор в коксе больше. Кроме того, связующего в анодной массе из смеси пека и смолы пиролиза больше на 1,0–1,5%, чем в массе каменноугольного пека. Следовательно, выход кокса из комбинированного связующего оказался больше количества кокса, полученного из образца анодной массы со стандартным связующим. Объем пор образца обожженной анодной массы предлагаемого состава также больше по сравнению с данным показателем образца традиционной обожженной массы. В связи с этим можно сделать предположение, что две образую-



щие компоненты пористости из трех вышеотмеченных должны повышаться. И наиболее вероятно, что пористость анодной массы увеличится с ростом добавки смолы пиролиза к каменноугольному пеку, что и служит доказательством полученных результатов исследований. Также установлено, что пористость кокса из связующего зависит от способности структурирования пека в приповерхностных слоях кокса-наполнителя, который равным образом зависит от группового состава пека, а именно α -, α_1 -, β - и γ -фракций.

Однако не исключено, что какой-либо пек в силу своих характерных особенностей в зависимости от его содержания может либо усиливать положительные свойства анодной массы, либо ухудшать их. Разнонаправленность действия параметров пеков на качественные характеристики анодной массы объясняет незначительное снижение пористости анодной массы при дозировке смолы пиролиза в количестве 10% [6].

Согласно современным представлениям о формировании свойств углеродонаполненных композиционных материалов их прочность определяется в первую очередь силами молекулярного взаимодействия (адгезией) между составляющими и их собственной или, так называемой, когезионной прочностью. Известно также, что с уменьшением толщины клеящей (цементирующей) составляющей прочность композиционного материала возрастает [12].

Из результатов исследований видно, что прочность анодной массы на основе смеси пека и смолы пиролиза заметно снижается до низкого уровня с прямолинейной зависимостью. Причем при увеличении доли смолы пиролиза и уменьшении вязкости пека снижается механическая прочность массы, что, возможно, связано с ухудшением смачиваемости кокса пеком. Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что разнонаправленность свойств анодной массы зависит от параметров качества пека, обусловленных различными процессами взаимодействия с коксом-наполнителем.

Химический состав и структура каменноугольного пека, как уже было упомянуто, определяют сложные физико-химические процессы его карбонизации и его технологические свойства как связующего в получении анодных материалов. Электропроводность, как и механическая прочность анодной массы, находится в прямой зависимости от коксообразующей и спекающей способности пека (содержания α -фракции, α_1 -фракции и коксового остатка). Увеличение их содержания в каменноугольных пеках приводит к большему количеству химических связей в связующей матрице (межфазовом слое), но в конечном итоге способствует упрочнению структуры обожженного материала и улучшению физико-химических свойств, в том числе и электропроводности [13–15].

Результаты исследований свидетельствуют, что при соответствии качественных показателей пека требованиям государственного стандарта получаемая анодная масса имеет достаточно высокую механическую прочность и реакционную способность. В то же время химическая активность анодной массы, оцениваемая по показателю разрушаемости в токе CO_2 , которая во многом определяет технологию электролиза и расход анода, является главным критерием оценки качества анодной массы [2]. Поэтому часто возникают проблемы, связанные с повышенным ценообразованием и, как следствие, с расстройством технологии электролиза, снижением технико-экономических показателей процесса, повышенным расходом анодной массы, ухудшением экологии. Исходя из этого, при подборе электродного сырья, технологических норм его подготовки и структуры анодной массы прежде всего необходимо руководствоваться требованиями достижения наименьшей разрушаемости анодной массы в токе CO_2 [16–18].

По своей химической активности анод не является неоднородным, поэтому более реакционноспособный кокс из связующего вступает во взаимодействие в первую очередь с оксифторидными комплексами криолит-глиноземного расплава.



Разрушаемость обожженной анодной массы на базе исследуемой ТСП зависит от соотношения кокса-наполнителя и связующего в шихте и их реакционной способности. Активность кокса-наполнителя во всех опытных образцах анодной массы одинакова. Это подтверждается результа-

тами проведенных исследований, которые показали, что при возрастании содержания ТСП и, соответственно, повышении доли более реакционноспособного кокса из связующего увеличения разрушаемости анодной массы не происходит, а наблюдается ее снижение.

Заключение

В ходе лабораторных испытаний получены следующие результаты:

- установлено, что при получении компаундированного связующего при возрастании доли ТСП в смеси значительно возрастают его реологические свойства;

- показано, что применение ТСП в качестве лигатуры к высокотемпературному каменноугольному пеку дает возможность уменьшить в связующем количество 3,4-бенз[а]пирена, что в свою очередь ведет к улучшению условий труда на рабочих местах при производстве «сухой» анодной массы для ванн с анодом Содерберга при получении первичного алюминия;

- установлено, что для достижения идентичных пластических свойств расход компаундированного связующего при производстве анодной массы на 1,5 % об. меньше по сравнению с общепринятым каменноугольным пеком марки «В»;

- показано, что добавка смолы пиролиза к каменноугольному высокотемпературному пеку в количестве 1–10% существенно не влияет на показатели пористости и удельного электросопротивления массы (их значения соответствуют нормам для марки АМ-0); однако добавка ТСП в количестве 10% снижает прочностные характеристики обожженной массы;

- экспериментально подтверждено, что использование комбинированного связующего в составе анодной массы дает возможность уменьшить количество связующего в целом на 2% (по сравнению с каменноугольным высокотемпературным пеком) и улучшить эксплуатационные характеристики «сухой» анодной массы;

Расчет ожидаемых расхода анодной массы и суммы выделяющихся канцерогенных веществ на 1 т алюминия при применении в качестве связующего каменноугольного высокотемпературного пека в смеси с ТСП показал, что можно достичь:

- 1) снижения удельного расхода каменноугольного пека на 6,7 кг/т алюминия;

- 2) снижения вредных выбросов в атмосферу в 1,7 раза¹³.

В конечном итоге показана возможность и целесообразность применения высокотемпературного каменноугольного пека в смеси с тяжелой смолой пиролиза в качестве связующего в анодной массе для электролиза криолит-глиноземного расплава при установке ванн с анодом Содерберга. Это позволит повысить экологию производства алюминия (в частности, уменьшить количество вредных соединений в воздухе рабочей зоны), а также практически использовать нецелевой продукт нефтепереработки – тяжелую смолу пиролиза.

¹³Расчетная инструкция (методика) по определению состава и количества вредных (загрязняющих) веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух при электролитическом производстве алюминия, с изменениями и дополнениями. / Calculation instruction (methodology) for determining the composition and quantity of harmful substances (pollutants) released into the atmosphere at electrolytic aluminum production with changes and additions.



Библиографический список

1. Нарасимхараган Р.К. Проблемы энергетики и охраны окружающей среды в алюминиевой промышленности // «Алюминий Сибири–2008»: сб. докладов XIV Междунар. конф. Красноярск, 2008. С. 390–397.
2. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to Aluminums Electrolysis // Dusseldorf Aluminums Verlag, 1993. 260 p.
3. Kovács V., Kiss L. Comparative Analysis of the Environmental Impacts of Aluminum Smelting Technologies // Light Metals. 2015. P. 529–534.
4. Мартынихин В.В., Головных Н.В., Полонский С.Б. Развитие алюминиевого производства в восточных регионах России: эколого-экономические аспекты // Известия Байкальского государственного университета. 2007. № 6. С. 61–66.
5. Машенцева И.А., Власова О.С. Анализ негативного воздействия на окружающую среду предприятий по производству алюминия // Инженерный вестник Дона: интернет-журнал 2017. № 1. URL: <http://indon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4031> (15.04.2018).
6. Дошлов О.И., Кондратьев В.В., Угапьев А.А. Влияние тяжелой смолы пиролиза на свойства анодной массы // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2013. № 2 (5). С. 67–75.
7. Лебедева И.П., Лубинский М.И., Дошлов О.И. К вопросу об использовании тяжелой смолы пиролиза для получения углеродистых материалов // Тезисы докладов V Респ. науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов алюминиевой и электродной промышленности. Иркутск, 2007. С. 77–78.
8. Лебедева И.П., Лазарев Д.Г., Дошлов О.И., Лубинский М.И., Лебедева Н.П. Перспективные технологии переработки тяжелой смолы пиролиза ОАО «Ангарский завод полимеров» // В мире научных открытий. 2009. № 5. С. 25–29.
9. Хайрутдинов И.Р. Пути получения пека из нефтяного сырья. М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1991. 48 с.
10. Дошлов О.И., Кондратьев В.В., Угапьев А.А.,

- Ким И.В. Компаундирование как перспективная технология производства альтернативных связующих материалов для производства анодной массы // Кокс и химия. 2015. № 1. С. 34–41.
11. Кузора И.Е., Дошлов О.И., Моисеев В.М., И.О. Дошлов. О перспективах производства нефтяных вяжущих в ОАО «АНХК». Мир нефтепродуктов // Вестник нефтяных компаний. 2015. № 5. С. 14–19.
12. Cheng-Te Lin, Min-Chiao Tsai, Chi-Young Lee, Hsin-Tien Chiu, Tsung-Shune Chin. Quantitative appraisal of the interfacial anchoring state of polyaromatic hydrocarbons during the formation of C/C composites. CARBON 48. 2010. P. 1049–1055.
13. Дошлов О.И., Коновалов Н.П., Окладников В.П. Адгезия и адгезивы. Теория адгезии, свойства и характеристики органических адгезивов, их модификация. В 3 т. Иркутск, 1998. Т. 1. 273 с.
14. Дошлов О.И. Адгезия и адгезивы. В 3 т. Иркутск, 2006. Т. 3. 212 с.
15. Mannweiler U. Reduction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) by using petroleum pitch as binder material: a comparison of anode properties and anode behavior of petroleum pitch and coal tar pitch anodes Fuel and Energy Abstracts. November, 1997. Vol. 38. Issue 6. P. 431.
16. Маракушина Е.Н., Храменко С.А., Голоунин А.В. Выделение канцерогенных ПАУ при карбонизации каменноугольного пека // Кокс и химия. 2010. № 3. С. 32–36.
17. Храменко, С.А., Анушенков А.Н., Маракушина Е.Н., Третьяков Я.А. Оценка эмиссии полиароматических углеводородов с поверхности анодов Содерберга // Цветные металлы. 2012. № 6. С. 34–37.
18. Москалев И.В., Тиунова Т.Н., Кисельков Д.М., Петрович А.П., Валцифер В.А., Стрельников В.Н. Синтетическая смола на основе антраценовой фракции каменноугольной смолы // Кокс и химия. 2014. № 11. С. 19–29.

References

1. Narasimharagan R.K. *Problemy jenergetiki i ohrany okruzhajushhej sredy v alju-minievoj promyshlennosti* [Problems of energy and environmental protection in aluminium industry]. *Sbornik dokladov XIV Mezhdunarodnoj konferencii "Aluminij Sibiri–2008"* [Collection of reports of XIV International Conference "Siberian aluminum–2008"]. Krasnojarsk, 2008, pp. 390–397. (In Russian).
2. Grjotheim K., Kvande H. Introduction to Aluminums Electrolysis. Dusseldorf Aluminums Verlag, 1993, 260 p.
3. Kovács V., Kiss L. Comparative Analysis of the Environmental Impacts of Aluminum Smelting Technologies. Light Metals. 2015, pp. 529–534.
4. Martynihin V.V., Golovnyh N.V., Polonskij S.B. Development of aluminum production in the eastern re-

- gions of Russia: environmental and economic aspects. *Izvestija Bajkal'skogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Baikal State University], 2007, no. 6, pp. 61–66. (In Russian).
5. Mashenceva I.A., Vlasova O.S. Analysis of negative environmental impact of aluminum producing enterprises. *Internet-zhurnal "Inzhenernyj vestnik Dona"* [E-journal Engineering Journal of Don], 2017, no. 1. URL: <http://indon.ru/ru/magazine/archive/n1y2017/4031> (accessed 15 April 2018).
6. Doshlov O.I., Kondrat'ev V.V., Ugap'ev A.A. Heavy pyrolysis tar effect on the characteristics of the anode mass. *Izvestija vuzov. Prikladnaja himija i biotekhnologija* [Proceedings of Universities. Applied Chemistry and Biotechnology]. 2013, no. 2 (5), pp. 67–75. (In Russian).



7. Lebedeva I.P., Lubinskij M.I., Doshlov O.I. K voprosu ob ispol'zovanii tjazhelej smoly piroliza dlja poluchenija uglegrafitovyh materialov [To the problem of using heavy pyrolysis resin for carbon graphite material production]. Tezisy dokladov V Resp. Nauch.-tehn. konf. molodyh uchenykh i specialistov aluminievoj i jelektrodnoj promyshlennosti [Abstracts of reports of V Republican scientific and technical Conference of young scientists and specialists of the aluminum and electrode industry]. Irkutsk, 2007, pp. 77–78. (In Russian).
8. Lebedeva I.P., Lazarev D.G., Doshlov O.I., Lubinskij M.I., Lebedeva N.P. Promising processing technologies for heavy pyrolysis resin of Angarsk polymer plant JSC. *V mire nauchnyh otkrytij* [Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture]. 2009, no. 5, pp. 25–29. (In Russian).
9. Hajrutdinov I.R. *Puti poluchenija peka iz neftjanogo syr'ja* [Ways of obtaining pitch from petroleum raw materials]. Moscow: CNITJeNeftehim Publ., 1991, 48 p. (In Russian).
10. Doshlov O.I., Kondrat'ev V.V., Ugap'ev A.A., Kim I.V. Producing anode binders by compounding. *Koks i himija* [Coke and Chemistry]. 2015, no. 1, pp. 34–41. (In Russian).
11. Kuzora I.E., Doshlov O.I., Moiseev V.M., Doshlov I.O. On production prospects of oil binders in JSC "Angarsk Petrochemical Company". *Mir nefteproduktov. Vestnik neftjanyh kompanij* [The world of oil products. The Oil Companies' Bulletin]. 2015, no. 5, 2015, pp. 14–19. (In Russian).

Критерии авторства

Дошлов О.И., Чижик К.И., Дошлов И.О., Подгорбунская Т.А., Афанасьева Р.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

12. Cheng-Te Lin, Min-Chiao Tsai, Chi-Young Lee, Hsin-Tien Chiu, Tsung-Shune Chin. Quantitative appraisal of the interfacial anchoring state of polyaromatic hydrocarbons during the formation of C/C composites. *CARBON* 48. 2010, pp. 1049–1055.
13. Doshlov O.I., Konovalov N.P., Okladnikov V.P. *Adgezija i adgezivy. Teorija adgezii, svoystva i harakteristiki organicheskikh adgezivov, ih modifikacija* [Adhesion and adhesives. The theory of adhesion, properties and characteristics of organic adhesives, their modification]. Irkutsk, 1998, vol. 1, 273 p. (In Russian).
14. Doshlov O.I. *Adgezija i adgezivy* [Adhesion and adhesives]. Irkutsk, 2006, 212 p. (In Russian).
15. Mannweiler U. Reduction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) by using petroleum pitch as binder material: a comparison of anode properties and anode behavior of petroleum pitch and coal tar pitch anodes. *Fuel and Energy Abstracts*. November, 1997, vol. 38, issue 6, p. 431.
16. Marakushina E.N., Hramenko S.A., Golounin A.V. Extraction of carcinogenic PAHs under coal tar pitch carbonization. *Koks i himija* [Coke and Chemistry]. 2010, no. 3, pp. 32–36. (In Russian).
17. Hramenko, S.A., Anushenkov A.N., Marakushina E.N., Tret'jakov Ja.A. Estimation of PAHs emission from soderberg anode surface. *Cvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 2012, no. 6, pp. 34–37. (In Russian).
18. Moskalev I.B., Tiunova T.H., Kisel'kov D.M., Petrovich A.P., Valcifer V.A., Synthetic resin based on the anthracene fraction of coal tar. *Koks i himija* [Coke and Chemistry]. 2014, no. 11, pp. 19–29. (In Russian).

Authorship criteria

Doshlov O.I., Chizhik, K.I., Doshlov I.O., Podgorbunskaya T.A., Afanasieva R.S. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 629.07 (571.56)

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-7-193-199>

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ БУРЬ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

© А.Л. Бояршинов¹, А.М. Ишков², А.П. Решетников³

Якутский научный центр СО РАН,

677980, Российская Федерация, Республика Саха (Якутия), г. Якутск, ул. Петровского, 2.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Оценка влияния магнитных бурь на безопасность дорожного движения в условиях Севера. **МЕТОДЫ.** Для обработки информации по карточкам учета дорожно-транспортных происшествий и журналов наблюдений магнитных бурь использовалась программа Statistica 10. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Магнитные бури влияют на безопасность дорожного движения. Проведенный корреляционно-регрессионный анализ показал высокую зависимость между дорожно-транспортными происшествиями и магнитными бурями, коэффициент корреляции равен 0,8. **ВЫВОДЫ.** В магнитоактивные дни происходит резкое ухудшение здоровья человека, в связи с чем увеличивается число дорожно-транспортных происшествий. При объявлении прогноза метеоусловий, которые как единый фактор риска дорожно-транспортных происшествий хорошо изучен, необходимо включать магнитные бури, также оказывающие влияние на безопасность движения. При разработке мероприятий по повышению безопасности дорожного движения необходимо при всех прочих факторах, влияющих на уровень безопасности движения, учитывать такой фактор как магнитные бури.

Ключевые слова: анализ, дорожно-транспортные происшествия, безопасность дорожного движения, магнитные бури, время года.

Информация о статье. Дата поступления 29 мая 2018 г.; дата принятия к печати 29 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Бояршинов А.Л., Ишков А.М., Решетников А.П. Влияние магнитных бурь на безопасность дорожного движения в условиях Севера // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 193–199. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-193-199

MAGNETIC STORM EFFECT ON TRAFFIC SAFETY IN THE CONDITIONS OF NORTH

A.L. Boyarshinov, A.M. Ishkov, A.P. Reshetnikov

Yakutsk Scientific Center SB RAS,

2, Petrovsky St., Yakutsk, Republic of Sakha Yakutia, 677980, Russian Federation

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is to assess the influence of magnetic storms on road traffic safety in the conditions of the North. **METHODS.** The Statistica 10 program is used to process information by road accident record cards and journals of magnetic storm observations. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Magnetic storms affect the road safety. The conducted correlation and regression analysis has shown a high correlation between the road accidents and magnetic storms. The correlation coefficient is 0.8. **CONCLUSIONS.** Magnetoactive days feature sharp deterioration in human health that results in the increased number of road accidents. The announcement of meteorological conditions (the latter have been thoroughly studied being a single risk factor of road accidents) should include mentioning of magnetic storms as affecting road safety. The factor of magnetic storms must be taken into account when developing measures to improve traffic safety alongside with other factor affecting the level of road safety.

¹Бояршинов Анатолий Леонидович, кандидат технических наук, заведующий сектором эргономики северной техники, e-mail: boyarshinov52@mail.ru

Anatoly L. Boyarshinov, Candidate of technical sciences, Head of the Sector of Northern Technology Ergonomics, e-mail: boyarshinov52@mail.ru

²Ишков Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры горных машин.

Aleksandr M. Ishkov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Mining Machinery

³Решетников Айаал Павлович, научный сотрудник отдела ритмологии и эргономики северной техники, e-mail: reshet_ayaal@mail.ru

Aiaal P. Reshetnikov, Researcher of the Department of Rythmology and Ergonomics of Machinery in the North, e-mail: reshet_ayaal@mail.ru



Keywords: *analysis, road accidents, traffic safety, magnetic storms, seasons*

Information about the article. Received May 29, 2018; accepted for publication June 29, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Boyarshinov A.L., Ishkov A.M., Reshetnikov A.P. Magnetic storm effect on traffic safety in the conditions of North. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 193–199. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-193-199 (In Russian).

Введение

Магнитные бури – это быстрые и сильные изменения в магнитном поле Земли, возникающие в периоды повышения солнечной активности. Замечено, что геомагнитные бури способны повлиять на многие сферы деятельности человека. Они вызывают помехи радиосвязи, систем навигации космических кораблей, разрушение энергетических систем, повреждение трубопроводов, выход из строя линий электропередач, взрывы трансформаторов на телефонных подстанциях.

Большое влияние магнитные бури оказывают на организм человека, и особенно на больных сердечнососудистыми заболеваниями: по статистике, во время магнитных бурь число инфарктов увеличивается более чем в три раза, инсультов – в два, приступов стенокардии – в полтора раза. Прежде всего магнитное поле изменяет одну из важнейших физических характеристик здоровья человека – вязкость крови. Во время магнитной бури кровь гу-

стеет, из-за чего ухудшается кислородный обмен, и в первую очередь на нехватку кислорода реагируют мозг и нервные окончания, что влечет изменение работы всего организма.

Исследованиями в разных странах на большом фактическом материале было показано, что число несчастных случаев и травматизма на транспорте увеличивается во время солнечных и магнитных бурь, что объясняется изменением деятельности центральной нервной системы. При этом увеличивается время реакции человека на внешние световой и звуковой сигналы, появляется заторможенность, медлительность, ухудшается сообразительность, увеличивается вероятность принятия неверных решений.

В настоящей работе ставится цель – исследовать влияние магнитных бурь на безопасность дорожного движения в условиях Севера.

Методы исследования

Авторами настоящей работы выполнены статистические исследования по определению влияния магнитных бурь на количество дорожно-транспортных происшествий (ДТП).

При проведении исследований использовалась статистическая информация, взятая из карточек учета ГИБДД по Республике Саха (Якутия), и журналов наблюдений лаборатории Института космических исследований и аэронавтики им. Ю.Г. Шафера Сибирского отделения РАН (ИКФИА СО РАН) в поселке Тикси Республики Саха (Якутия) за период 2009–2013 гг. Полярная обсерватория ИКФИА СО РАН в

поселке Тикси находится на территории, где наиболее ярко наблюдаются явления космической непогоды: сюда попадают большие потоки частиц, вызывающих возмущения атмосферы, здесь легче отслеживать процессы, происходящие в космосе. Влияние магнитных бурь более отчетливо прослеживаются ближе к полюсам, то есть в высоких широтах, а ближе к экватору их влияние ослабевает. Поэтому наблюдения за магнитными бурями в поселке Тикси являются наиболее полными и объективными.

На рис. 1 в виде графиков отражено влияние магнитных бурь на количество



ДТП в зависимости от времени года. Эти зависимости хорошо коррелируются между собой.

Из графиков видно, что большее число ДТП приходится на май, июнь, июль, август месяцы с большим числом наблюдаемых магнитных бурь.

Для оценки влияния магнитных бурь

на количество ДТП проведен корреляционно-регрессионный анализ (рис. 2). В результате математического расчета получена линейная зависимость между количеством ДТП и количеством магнитных бурь с коэффициентом корреляции, равным 0,8 характеризующим зависимость между этими событиями.

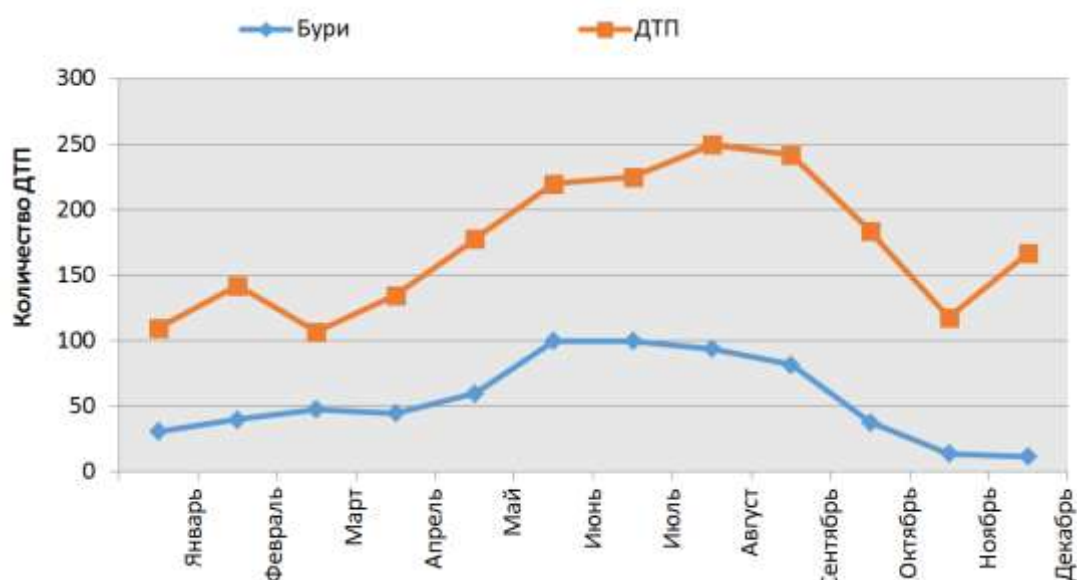


Рис. 1. Зависимость влияния магнитных бурь на количество ДТП по времени года
Fig. 1. Dependence of the influence of magnetic storms on the number of road accidents by seasons

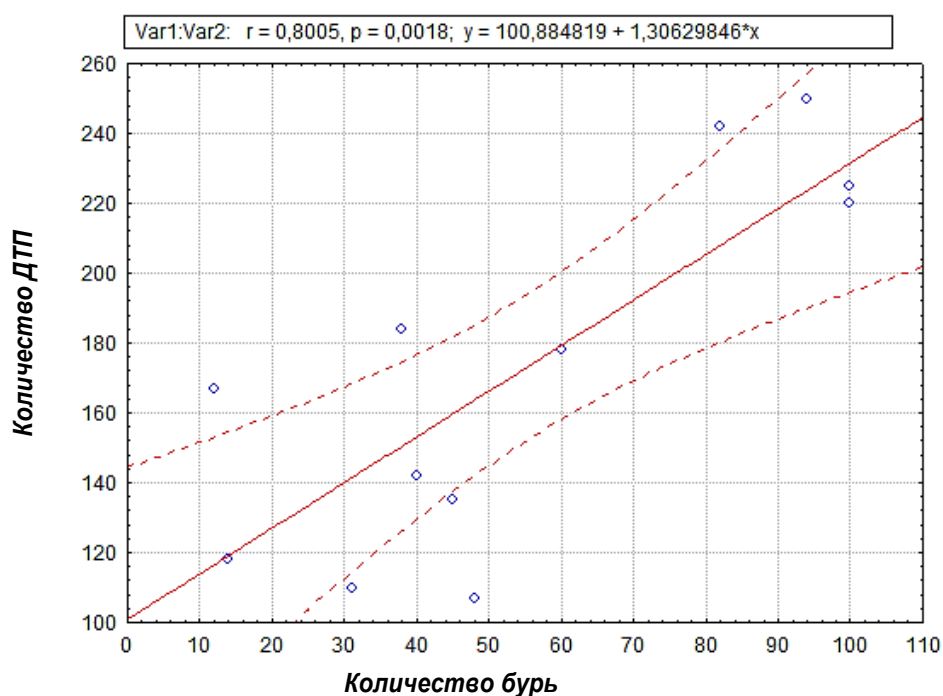


Рис. 2. Влияние магнитных бурь на количество ДТП
Fig. 2. Influence of magnetic storms on the number of road accidents



На рис. 3 показана зависимость от магнитных бурь количества ДТП с участием мужчин, женщин и детей. Отмечено, что мужчины наиболее подвержены воздействию магнитных бурь, чем женщины. Причем количество ДТП коррелируются с интенсивностью магнитных бурь. Из графика видно, что магнитные бури оказывают вли-

яние и на детей.

На рис. 4 показана зависимость числа ДТП по дням недели. Из диаграммы видно, что больше всего аварий случается в понедельник, пятницу, субботу, но явным лидером является пятница. Меньше всего ДТП происходит в среду.

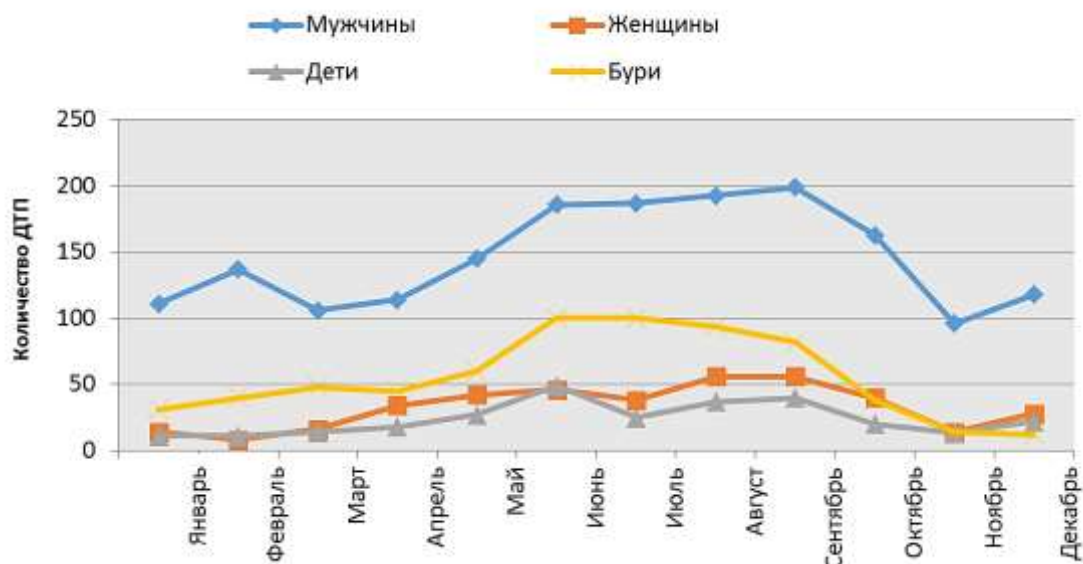


Рис. 3. Влияние магнитных бурь на количество ДТП с участием мужчин, женщин, детей по времени года

Fig. 3. Influence of magnetic storms on the number of road accidents involving men, women, children by seasons

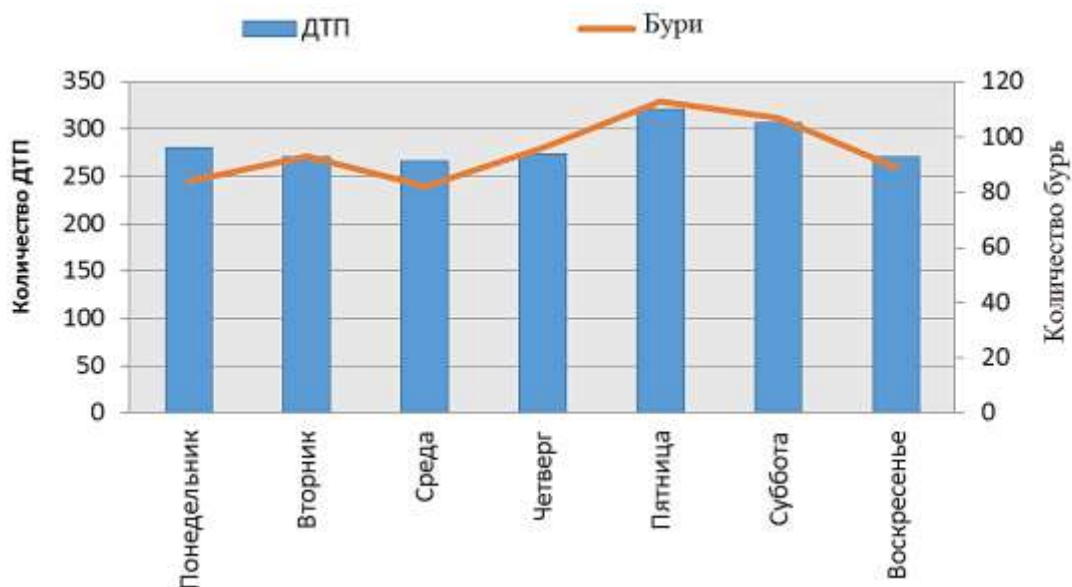


Рис. 4. Влияние магнитных бурь на количество ДТП по дням недели

Fig. 4. Influence of magnetic storms on the number of road accidents on the days of the week



На рис. 5 показано влияние магнитных бурь на количество ДТП по часам суток. Как показывает анализ, наибольшее число ДТП происходит в период времени с 12:00 до 16:00, затем следует небольшой спад. Наименьшее число аварий приходится на период с 0:00 до 8:00, которому соот-

ветствует низкая частота магнитных бурь.

На рис. 6, 7 представлены диаграммы, отражающие влияние магнитных бурь на количество совершенных мужчинами и женщинами ДТП, в зависимости от возраста.

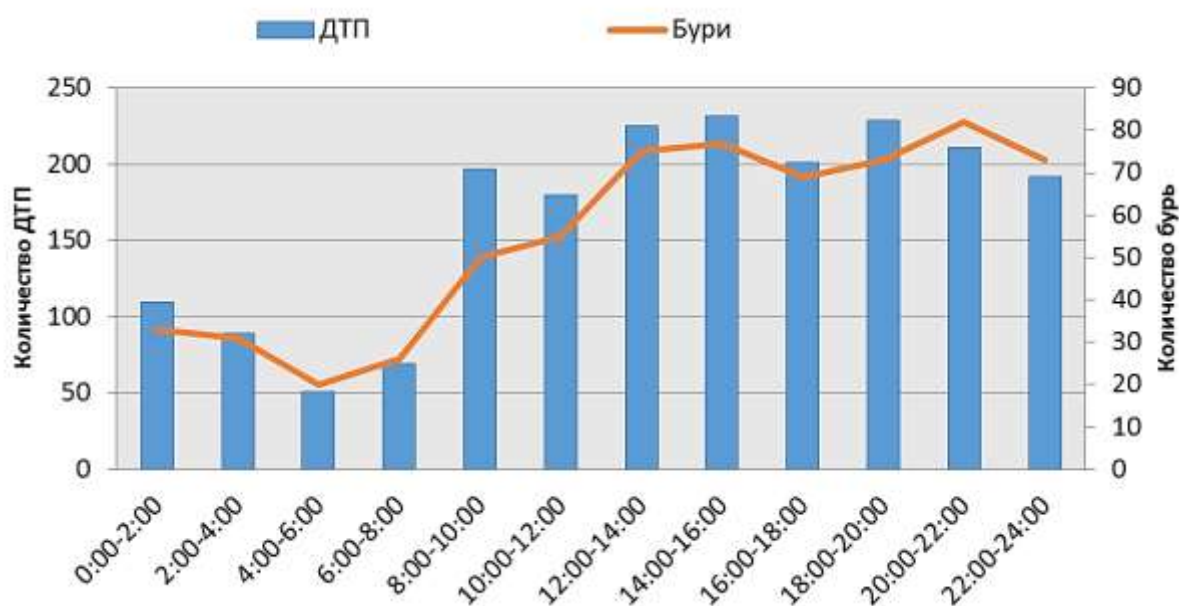


Рис. 5. Влияние магнитных бурь на количество ДТП по времени суток
Fig. 5. Influence of magnetic storms on the number of road accidents by the hour of the day

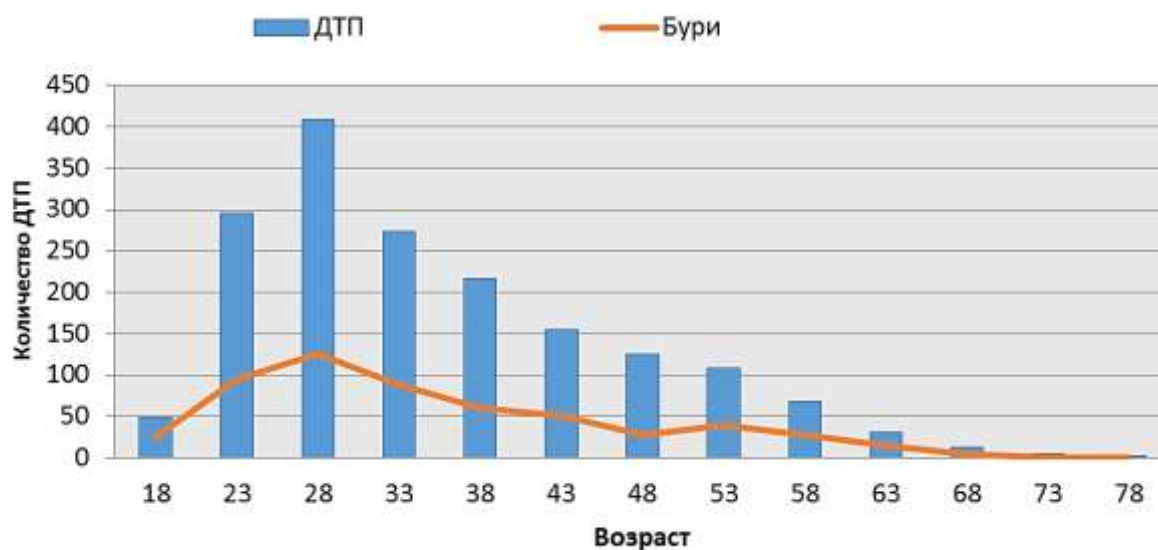


Рис. 6. Влияние магнитных бурь на количество ДТП, совершенных мужчинами, в зависимости от возраста
Fig. 6. Influence of magnetic storms on the number of road accidents caused by men depending on age

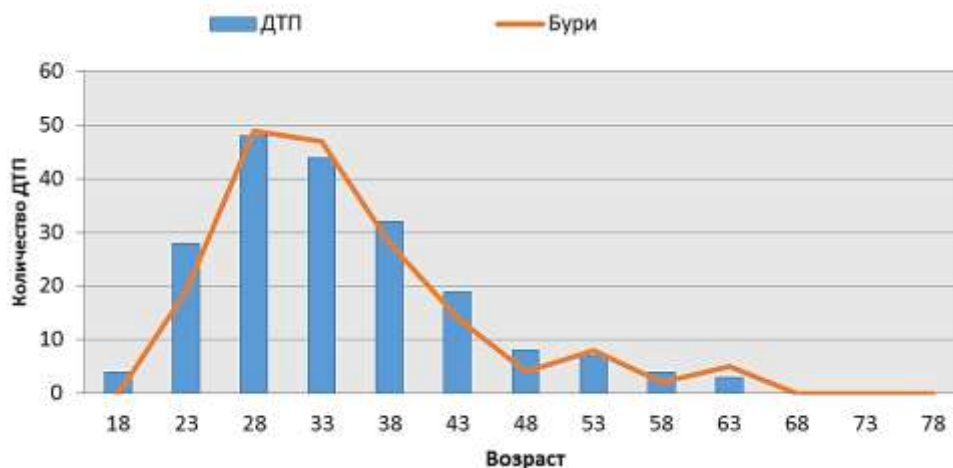


Рис. 7. Влияние магнитных бурь на количество ДТП, совершенных женщинами, в зависимости от возраста

Fig. 7. Influence of magnetic storms on the number of road accidents caused by women depending on age

В результате анализа диаграмм, приведенных на рис. 6 и 7, можно заключить, что влиянию магнитных бурь наиболее подвержены водители, как мужчины,

так и женщины, в возрасте от 23 до 33 лет. Для более полного анализа этого события необходимы дополнительные исследования.

Выводы

Таким образом, в ходе проведенных исследований установлено, что магнитные бури оказывают серьезное влияние на количество ДТП – их число значительно увеличивается. Поэтому при разработке мероприятий по повышению безопасности до-

рожного движения необходимо учитывать такой фактор, как магнитные бури, а также включать информацию о возможности возникновения магнитной бури при объявлении прогноза метеоусловий.

Библиографический список

1. Бояршинов А.Л., Ишков А.М., Решетников А.П. Особенности показателей и причин аварийности на дорогах в условиях Севера // Автотранспортное предприятие. 2014. № 12. С. 13–16.
2. Владимирский Б.М., Темурьянц Н.А., Мартынюк В.С. Космическая погода и наша жизнь. Фрязино: Век 2, 2004. 224 с.
3. Зубов В.Н., Нехорошева И.В. Влияние солнечной активности на здоровье человека // Сознание и физическая реальность. 2007. Т. 12. № 5. С. 29–39.
4. Ишков А.М., Бояршинов А.Л., Решетников А.П. Исследование ДТП на автомобильных дорогах Республики Саха (Якутия) // Автотранспортное предприятие. 2016. № 10. С. 17–20.
5. Клейменова Н.Г. Влияние космической погоды на человека // Земля и Вселенная. 2013. № 6. С. 74–82.
6. Лупой К.А. Влияние солнечной активности на обеспечение безопасности дорожного движения // Вестник СибАДИ. 2009. № 3 (13). С. 82–85.
7. Лупой К.А. Экологическая безопасность дорожного движения и план деятельности в условиях сол-

- нечной активности // Вестник СибАДИ. 2010. № 2 (16). С. 87–90.
8. Решетников А.П., Ишков А.М., Бояршинов А.Л. Анализ детского дорожно-транспортного травматизма в городе Якутске // Автотранспортное предприятие. 2016. № 11. С. 21–24.
9. Самсонов С.Н. Космическая погода 2017: последствия для жизни на земле // Новые информационные технологии в медицине, биологии, фармакологии и экологии: материалы Междунар. конф. (Гурзуф, 02–12 июня 2017 г.). М.: Изд-во ООО «Институт новых информационных технологий», 2017. С. 154–158.
10. Петрова С.В., Яруллина А.Д., Ягафарова З.А. Магнитные бури и их влияние на человеческий организм // Ломоносовские чтения на Алтае: фундаментальные проблемы науки и образования: сборник научных статей международной конференции (Барнаул, 14–17 ноября 2017 г.). Барнаул: Изд-во Алтайского государственного университета, 2017. С. 136–138.



11. Чижевский А.Л. Земное эхо солнечных бурь. 2-е изд. М.: Мысль. 1976. 367 с.
12. Cornélissen G, Wendt HW, Guillaume F, Bingham C, Halberg F, Breus TK, et al. Disturbances of the interplanetary magnetic field and human pathology. *Chronobiologia*. 1994. No. 21. P. 151–154.
13. Samsonov S.N., Manykina V.I. Space weather parameters capable of influencing health of human being // *Odessa Astronomical Publications*. 2012. Vol. 25. No. 2. P. 222–225.
14. Samsonov S.N., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V.,

- Petrova P.G. The effect of space weather on human heart diseases in subauroral latitudes // *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014. Vol. 50. No. 7. P. 719–727.
15. Strelakova A.A., Petrova P.P., Komzin K.V., Malyshev L.A., Samsonov S.N., Parshina S.S., Andreev A.A. Assessment of the space weather effect on human health in the arctic zone using the example of Tiksi settlement International // *Journal of Biomedicine*. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 56–59.

References

1. Boyarshinov A.L., Ishkov A.M., Reshetnikov A.P. Features of indicators and causes of road accidents in the North. *Avtotransportnoe predpriyatie*. [Motor Company]. 2014, no. 12, pp. 13–16. (In Russian).
2. Vladimirov B.M., Temur'yanc N.A., Martynyuk V.S. *Kosmicheskaya pogoda i nasha zhizn'* [Space weather and our life]. Fryazino: Vek 2 Publ., 2004, 224 p. (In Russian).
3. Zubov V.N., Nekhorosheva I.V. Solar activity effect on human health. *Soznanie i fizicheskaya real'nost'* [Consciousness and physical reality]. 2007, vol. 12, no. 5, pp. 29–39. (In Russian).
4. Ishkov A.M., Boyarshinov A.L., Reshetnikov A.P. Study of accidents on the roads of the Republic of Sakha (Yakutia). *Avtotransportnoe predpriyatie* [Motor Company]. 2016, no. 10, pp. 17–20. (In Russian).
5. Kleimenova N.G. The influence of space weather on humans. *Zemlya i Vselennaya* [Earth and Universe]. 2013, no. 6, pp. 74–82. (In Russian).
6. Lupoi K.A. The influence of solar activity on the road safety. *Vestnik SibADI* [Vestnik SibADI]. 2009, no. 3 (13), pp. 82–85. (In Russian).
7. Lupoi K.A. Environmental road safety and plan of actions under solar activity. *Vestnik SibADI* [Vestnik SibADI]. 2010, no. 2 (16), pp. 87–90. (In Russian).
8. Reshetnikov A.P., Ishkov A.M., Boyarshinov A.L. Analysis of children's road traffic injuries in the city of Yakutsk. *Avtotransportnoe predpriyatie* [Motor Company]. 2016, no. 11, pp. 21–24. (In Russian).
9. Samsonov S.N. *Kosmicheskaya pogoda 2017: posledstviya dlya zhizni na zemle* [Space weather 2017: consequences for life on the Earth]. *Materialy Mezhdunarodnoi konferentsii "Novye informacionnye tekhnologii v medicine, biologii, farmakologii i ekologii"* [Proceedings of the International conference "New information technologies in medicine, biology, pharma-

- cology and ecology"]. Moscow: OOO "Institute of new information technologies" Publ., 2017, pp. 154–158. (In Russian).
10. Petrova S.V., Yarullina A.D., Yagafarova Z.A. *Magnitnye buri i ikh vliyanie na chelovecheskii organizm* [Magnetic storms and their effect on human body]. *Sbornik nauchnykh statei mezhdunarodnoi konferentsii "Lomonosovskie chteniya na Altai: fundamental'nye problemy nauki i obrazovaniya"* [Collection of scientific articles of the international conference "Lomonosov's readings in Altai: fundamental problems of science and education"]. Barnaul: Altai state university Publ., 2017, pp. 136–138. (In Russian).
 11. Chizhevskij A.L. *Zemnoe ekho solnechnykh bur'* [Earth echo of solar storms]. Moscow: Mysl' Publ., 1976, 367 p. (In Russian).
 12. Cornélissen G, Wendt HW, Guillaume F, Bingham C, Halberg F, Breus TK, et al. Disturbances of the interplanetary magnetic field and human pathology. *Chronobiologia*. 1994, no. 21, pp. 151–154.
 13. Samsonov S.N., Manykina V.I. Space weather parameters capable of influencing health of human being. *Odessa Astronomical Publications*. 2012, vol. 25, no. 2, pp. 222–225.
 14. Samsonov S.N., Kleimenova N.G., Kozyreva O.V., Petrova P.G. The effect of space weather on human heart diseases in subauroral latitudes. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*. 2014, vol. 50, no. 7, pp. 719–727.
 15. Strelakova A.A., Petrova P.P., Komzin K.V., Malyshev L.A., Samsonov S.N., Parshina S.S., Andreev A.A. Assessment of the space weather effect on human health in the arctic zone using the example of Tiksi settlement International. *Journal of Biomedicine*. 2018, vol. 8, no. 1, pp. 56–59.

Критерии авторства

Бояршинов А.Л., Ишков А.М., Решетников А.П. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Boyarshinov A.L., Ishkov A.M., Reshetnikov A.P. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



ШКОЛЬНЫЕ ПЕРЕВОЗКИ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ

© А.Б. Бутузова¹, Н.А. Елфимова²

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В статье рассмотрены основные требования к перевозке школьников автомобильным транспортом и опыт школьных перевозок в России, а также за рубежом. Освещен вопрос развоза учащихся после занятий, а также специальных перевозок групп учащихся при организации экскурсионных, развлекательных, спортивных и иных культурно-массовых мероприятий. **МЕТОДЫ.** В основе работы лежит анкетное обследование потенциальных пользователей транспортных услуг. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В работе освещены вопросы увеличения объема перевозок, а также условия, при которых снижается себестоимость, а соответственно, и тариф. В результате исследования получено значение величины тарифа на перевозку одного школьника. Проведенное анкетирование позволяет определить целесообразность открытия коммерческого маршрута доставки школьников до школы.

ВЫВОДЫ. Организация регулярных школьных перевозок – удобный способ доставки школьников на занятия и обратно, особенно детей младшего школьного возраста. В большинстве случаев учебные заведения не могут содержать подвижной состав, и школьники самостоятельно добираются до школы пешком либо на общественном транспорте, что не всегда безопасно, или же родители доставляют детей на семейном автомобиле, что тоже не всегда удобно. Поэтому открытие коммерческого маршрута регулярной перевозки школьников до школы и обратно может оказаться достаточно полезным начинанием.

Ключевые слова: перевозка школьников, организация перевозки школьников автомобильным транспортом.

Информация о статье. Дата поступления 20 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 20 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Бутузова А.Б., Елфимова Н.А. Школьные перевозки в России и за рубежом // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 200–207. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-200-207

SCHOOL TRANSPORTATION IN RUSSIA AND ABROAD

A.B. Butuzova, N.A. Elfimova

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

ABSTRACT. PURPOSE. The article describes the basic requirements for the transportation of schoolchildren by motor transport and the experience of schoolchildren transportation in Russia and abroad. It deals with the issue of schoolchildren transportation after classes, as well as organization of special transportation of groups of students in case of excursions, entertainment, sport and other cultural events. **METHODS.** The study is based on the questionnaire survey of potential users of transport services. **RESULTS.** The paper discusses the problems of increasing the volume of transportation, describes the conditions under which the cost and, accordingly, the tariff are reduced. The study results in obtaining the value of the tariff for the transportation of one student. Conducted survey allows to determine the feasibility of opening a commercial route to deliver students to school. **CONCLUSIONS.** Organization of regular school transportation is a convenient way of delivering students, especially primary school pupils to school and back. In most cases, educational institutions can not afford to have their own rolling stock. Therefore, students have to reach school on their own – on foot

¹Бутузова Александра Борисовна, кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильного транспорта, e-mail: alexa.kupriyanova@gmail.com

Butuzova, Alexandra Borisovna, candidate of technical Sciences, docent of Department of automobile transport, e-mail: alexa.kupriyanova@gmail.com

²Елфимова Наталия Алексеевна, студентка, e-mail: natalia.elfimova@tl-istu.com
Elfimova Natalia, student, e-mail: natalia.elfimova@tl-istu.com



or by public transport. It is not always safe, especially for younger students. Sometimes parents deliver their children by car, which also brings some inconvenience. Therefore, the opening of a commercial route of regular transportation of students to school and back can be useful.

Keywords: *transportation of schoolchildren, organization of schoolchildren transportation by motor transport*

Information about the article. Received April 20, 2018; accepted for publication June 20, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Butuzova A.B., Elfimova N.A. School transportation in Russia and abroad. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 7, pp. 200–207. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-200-207 (in Russian).

Введение

Школьные перевозки – это организованные перевозки учащихся, не относящиеся к перевозкам общего пользования: доставка учащихся в образовательные организации, развоз учащихся по окончании занятий, специальные перевозки групп учащихся при организации экскурсионных, развлекательных, спортивных и иных культурно-массовых мероприятий [1].

Образовательные учреждения, имеющие необходимую производственно-техническую, кадровую и нормативно-методическую базы, позволяющие обеспечить безопасность дорожного движения при осуществлении школьных перевозок, организуют школьные перевозки самостоятельно. Однако содержание автобуса большой вместимости на балансе общеобразовательного учреждения дело очень затратное

(бюджет большинства учебных заведений не позволяет иметь достаточно дорогую машину). В случае возникновения потребности в регулярных школьных перевозках администрация школы может обратиться к организациям, оказывающим данные услуги. Хорошей альтернативой полноразмерным автобусам может стать микроавтобус, если нужно перевозить небольшое количество школьников. И здесь можно говорить об организации коммерческого маршрута доставки школьников. Хотя этот вид деятельности и связан с множеством трудностей и особенностей, но для предпринимателей, стремящихся совместить социальный эффект и экономический, организация «школьного такси» может оказаться экономически привлекательным проектом [1, 2].

Данные исследования

Наибольших успехов в области перевозки школьников достигли США, где впервые школьные автобусы для массовой перевозки детей к местам учебы были внедрены около ста лет назад. В США зарегистрировано 480,5 тыс. школьных автобусов, из которых 70% приходится на частные компании либо школы, 30% приходится на подрядчиков – подрядные компании, входящие в систему SBC (School Bus Contractor). Руководство этих компаний заинтересовано в исправности техники и профессионализме сотрудников. По статистике школьные автобусы в США – самый безопасный вид транспорта [3].

По немецким законам обязатель-

ность и гарантированная доступность общешкольного образования означает в частности и гарантированную досягаемость, то есть заведомую «преодолимость» дороги в школу.

Понятие «дорога к школе» (Schulweg) является еще и юридической категорией. В юридическом смысле это кратчайшее расстояние между местом постоянного жительства школьника и основным местом его учебы.

Формулировка «кратчайшее расстояние» в данном случае несет именно юридический, а не геометрический смысл. Одни школьники бесплатно едут к месту учебы на маршрутных, а то и на специальных



школьных автобусах, другие идут туда пешком, либо их подвозят родители на своем личном транспорте.

Если от дома до школы (по прямой) расстояние меньше определенного значения, то школьники добираются самостоятельно.

До некоторого времени власти федеральных земель Германии сами определяли расстояние, начиная с которого школьники получают право бесплатной доставки транспортом. Это определено земельными предписаниями о свободном пользовании (Freistellungsverordnung, или FVO). Итак, бесплатная доставка школьникам транспортом гарантируется, если кратчайшее расстояние превышает:

- для учеников начальных школ – 2 километра;
- для учеников основных и реальных школ (Hauptschule, Realschule) и подобных им (например, Sekundarschule, Mittelschule, Oberschule), а также учеников 5–10 классов объединенных школ (Gesamtschule) и гимназий – 3,5 километра;
- для гимназистов старшей ступени (gymnasiale Oberstufe), профшкол, школ для взрослых (например, Abendschule, Kolleg) – 5 километров.

С учетом состояния здоровья школьника право бесплатного пользования транспортом для поездок в школу может быть предоставлено и при меньшем расстоянии от дома. Согласно Закону о поддержке граждан (Personenbeförderungsgesetz или PbefG, § 42, 43) и FVO, плату за перевоз школьников вносят коммунальные школьные власти, так называемые Öffentliche Schulträger. Проездные документы выдает, как правило, школа. В некоторых землях они годны по отмеченному маршруту или в отмеченной местности. Но в других землях, например, в Северном Рейне-Вестфалии, ими можно воспользоваться именно для поездки в школу или из школы, во внешкольное время эти билеты недействительны [4].

В Великобритании, Канаде и Японии почти все перевозки школьников осуществляют специальные транспортные подряд-

ные организации. В континентальной Европе школьные автобусы в изначальном американизированном варианте (ежедневная перевозка детей в школу и обратно домой) не получили достаточного распространения в силу развитой и разветвленной системы общественного автотранспорта и исторически сложившейся системы обучения и проживания детей в школьных пансионах и школах-интернатах. Для массовых выездов на природу, экскурсии, в пионерские и скаутские лагеря здесь используются стандартные туристские или пригородные автобусы.

Разделяют городские школьные перевозки и школьные перевозки в сельской местности. В свою очередь городские школьные перевозки разделяют на регулярные (ежедневно в школу и из школы) и нерегулярные (поездки в лагерь, на экскурсию и т.д.) [4, 3].

В настоящее время регулярные школьные перевозки не получили достаточного развития в России, особенно коммерческие школьные перевозки. Российский опыт городских регулярных школьных перевозок незначителен. При этом, как показывает зарубежный опыт, регулярные школьные перевозки – это очень удобный и безопасный способ доставки школьников до учебного заведения, особенно детей младшего школьного возраста. Но бюджет большинства учебных заведений не позволяет содержать автобус. В связи с этим школьники добираются до школы любым удобным им способом – начиная от поездки на автомобиле родителей до поездки на общественном транспорте или вообще пешком. В больших городах родители всегда в какой-то степени рискуют, отправляя своего ребенка без сопровождения в школу, в связи с чем запуск специального школьного автобуса может оказаться хорошим начинанием [1].

В 2002 году в Калуге было создано государственное учреждение «Школьный автобус» для обеспечения безопасной перевозки школьников в сельской местности.

Государственное казенное учреждение Калужской области «Школьный авто-



бус» обеспечивает перевозку школьников в сельской местности, осуществляет закупку и полное содержание автобусов, включая техническое обслуживание и ремонт, наем на работу и выплату зарплаты водителям, обеспечение их форменной одеждой. В настоящее время ГКУ Калужской области «Школьный автобус» является одним из самых крупных транспортных предприятий области.

На настоящий момент численный состав учреждения составляет 332 сотрудника. Из них водителей – 255 человек, ремонтники и МОП – 29 человек. На подвозе детей в районах области по 236 маршрутам занято 232 водителя, в том числе 3 подменных, и 4 подменных водителя находятся на базе ГКУ Калужской области «Школьный автобус» в г. Калуге и готовы в случае необходимости отправиться в любой район области. Ежедневно перевозится 9201 учащихся [5].

В рамках выпускной квалификационной работы, выполненной в Иркутском национальном исследовательском техническом университете на базе кафедры «Менеджмент и логистика на транспорте», на примере СОШ № 63 г. Иркутска, было проведено обследование, направленное на выявление возможности и необходимости запуска коммерческого школьного автобуса.

Коммерческий школьный автобус – это новый вид услуги, который ранее не был известен на рынке транспортных услуг. Для того чтобы выявить реакцию населения на новую услугу, а также определить потенциальных пользователей услуги по организации регулярной доставки школьников, было проведено анкетирование [6].

Разработана специальная анонимная анкета для родителей школьников. Анкета включает в себя вопросы:

- улица проживания;
- ближайший остановочный пункт общественного транспорта;
- каким способом ваш ребенок добирается до школы;
- сколько времени ваш ребенок тратит, чтобы добраться до школы;

– согласились бы вы, чтобы вашего ребенка доставляли до/от школы (до/от дома) на специальном платном школьном автобусе (доставка осуществляется либо от близлежащего остановочного пункта общественного транспорта, либо непосредственно от подъезда до школы и обратно согласно расписанию уроков);

– сколько вы готовы платить за школьный автобус в месяц.

Всего было роздано 450 анкет. В результате отвечено было 205 анкет, преимущественно родители учащихся 1-х–2-х классов. Почти 50% среди опрошенных – это родители учащихся 1-х классов. В результате анкетирования выявлено, что на индивидуальном транспорте добираются 58% школьников (неизвестно, сколько пешком и на общественном транспорте). При этом 39% учащихся тратят от 11 до 15 минут времени и 29% – от 16 до 25 минут, чтобы добраться до школы преимущественно на индивидуальном транспорте.

Как показало анкетирование, на вопрос *«Согласились бы вы, чтобы вашего ребенка доставляли до/от школы (до/от дома) на специальном платном школьном автобусе»* 25% респондентов, это 50 человек, ответили «да». Соответственно 75% – это 154 человек из 205, ответили отрицательно. Из 50 родителей, ответивших положительно на данный вопрос, 29 человек (56,9%) – родители учащихся 1-х классов, 10 человек (23,53%) – родители учащихся 2-х классов и лишь 8 респондентов (15,69%) – родители учащихся 3-х классов.

Несмотря на то что большинство родителей ответили отрицательно, примерно 25% родителей положительно отреагировали на организацию доставки школьников до школы и обратно. При этом предпочтительный ценовой диапазон от 1000 до 1500 руб. в месяц.

Школьный автобус предназначен для организованной перевозки детей к учебным заведениям, а также к местам проведения экскурсий, различных учебных и развлекательных мероприятий. В соответствии с ГОСТ Р 51160-98 [7] к перевозке предъявляются следующие требования:



– спереди и сзади автобуса должны быть установлены опознавательные знаки «Перевозка детей»;

– автобус должен быть оснащен устройством, обеспечивающим автоматическую подачу звукового сигнала при движении задним ходом;

– элементы всех наружных устройств непрямого обзора, установленных на автобусе, должны иметь электрообогрев;

– в автобусе должны быть предусмотрены только места для сидения;

– сиденья, предназначенные для детей, должны быть обращены вперед по ходу автобуса;

– автобус не должен быть старше 10 лет;

– согласно действующему законодательству, все автобусы должны быть оснащены спутниковыми навигаторами (ГЛОНАСС или ГЛОНАСС/GPS) и тахографами.

Скорость движения выбирается водителем в зависимости от дорожных, метеорологических и других условий, но при этом во всех случаях скорость не должна превышать 60 км/час.

К перевозке детей допускаются квалифицированные водители, которые обладают правами категории «D» и имеют стаж не менее 3 лет. Водители должны предоставить медицинскую справку, позволяющую работать в качестве водителя пассажирского транспорта [3].

Целью выпускной квалификационной работы являлась разработка проекта по организации регулярной доставки школьников на коммерческом автобусе и обоснование его экономической эффективности на примере СОШ № 63 г. Иркутска. Это муниципальное автономное общеобразовательное учреждение расположено по

адресу: ул. Терешковой, дом 38. В качестве основы для исследования был предложен проект по открытию коммерческого маршрута доставки школьников младших классов начальной школы. Акцент был сделан именно на младшие классы, так как маленькие школьники, как правило, добираться в учебное заведение в сопровождении взрослых. Для реализации этого проекта был выбран 20-местный Мерседес Спринтер Классик 311 CDI 2014 года выпуска. Данный автомобиль полностью удовлетворяет всем требованиям ГОСТ Р 51160-98 для перевозки школьников по регулярным маршрутам [7].

Согласно «СНиП 2.07.01-89* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений»³, допускается посещение общеобразовательного учреждения на расстоянии транспортной доступности: 15 минут езды в одну сторону – для школьников начальных и средних классов, и 50 минут езды – для старшеклассников.

Если за основу брать территориальную принадлежность домов, то маршрут движения регулярного коммерческого школьного автобуса будет проходить по основным улицам района, прилегающего к школе № 63 – улицы Терешковой, Лермонтова, Жуковского, Гоголя, Маяковского, Чайковского. Более детальный маршрут будет зависеть от места жительства учащихся, причем для привлечения школьников возможна доставка детей непосредственно до и от места жительства каждого ребенка (при наличии подъездных путей)⁴ [8–15].

Автобус будет двигаться строго по расписанию, что позволит родителям ориентироваться, в какое именно время автобус подъедет к близлежащему остановоч-

³СНиП 2.07.01-89* Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений: утв. постановлением Госстроя СССР от 16.05.1989 г. № 78 / SNIP (Construction Rules and Regulations) 2.07.01-89* Urban planning. Planning and development of urban and rural settlements: approved by the Decree of the USSR State Committee for Construction of 16 May 1989 No. 78.

⁴Об утверждении Правил организованной перевозки группы детей автобусами: постановление Правительства РФ от 17.12.2013 г. № 1177 (ред. от 23.12.2017 г.) / On approval of the Rules for the organized transportation of a group of children by bus: Decree of the Government of the Russian Federation of 17 December 2013 No. 1177 (as amended on 23 December 2017).



ному пункту либо непосредственно к месту проживания.

Основной упор планируется сделать на учеников начальной школы, особенно учащихся 1–4-х классов, так как большинство из них самостоятельно передвигаться на общественном транспорте пока не могут.

График работы маршрута будет выстраиваться в соответствии с расписанием занятий до школы, с учетом временных требований.

Главным критерием, определяющим выбор использования «школьного такси», выступает тариф на перевозку одного школьника.

Исходя из выполненной в проекте калькуляции перевозок, себестоимость перевозки одного школьника за месяц составит 2854,68 руб., в расчете на 52 поездки в месяц на одного школьника.

Стоимость перевозки одного школьника на начальном этапе можно установить 3000 рублей в месяц.

При определенном тарифе за перевозку одного школьника (3000 руб. в месяц) и планируемом количестве поездок одного школьника (52 поездки в месяц) стоимость одной поездки составит 57,69 руб., что дешевле, чем стоимость одной поездки на такси, но дороже стоимости одной поездки на общественном транспорте. Однако с точки зрения безопасности и комфорта вариант передвижения школьников на «школьном такси» значительно лучше.

При этом с увеличением объема перевозок себестоимость снижается, соответственно, тариф тоже становится меньше. Уменьшение тарифа может привлечь еще больше школьников. Возможно привлечение учащихся старших классов либо из близлежащих школ, например, школы № 80.

Для привлечения клиентов на начальном этапе возможна оплата за каждую поездку отдельно, средняя стоимость поездки равна примерно 58 рублей.

Заключение

На рынке транспортных услуг коммерческий школьный автобус – это инновационный вид предпринимательства. Следовательно, конкуренция минимальная. Поэтому можно варьировать уровнем тарифа на предлагаемую услугу.

Особенно актуальным данный вопрос является для жителей коттеджных поселков, если на территории таких поселков нет школ, и родителям приходится само-

стоятельно возить детей до ближайшей городской школы.

Для внедрения проекта коммерческого школьного автобуса необходимо найти учебные заведения, заинтересованные в организованной перевозке учащихся, проинформировать родителей и детей, которые готовы воспользоваться услугами коммерческого школьного автобуса.

Библиографический список

1. Матиас Лауданум. Свой бизнес: школьный автобус [Электронный ресурс]. URL: <https://http://mylektsii.ru/14-24323.html> (12.03.18).
2. Автобусы Америки: школьные [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gruzovikpress.ru/article/11187-obzor-avtobusnoy-otrasli-severnoy-ameriki-avtobusy-ameriki-shkolnye/>(12.03.18).
3. Пашутина Н.А. Опыт организации школьных перевозок специализированным пассажирским транспортом в Российской Федерации [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-organizatsii-shkolnyh-perevozok-spetsializirovannym-passazhirskim-transportom-v-rossiyskoy-federatsii> (12.03.18).

4. Дорога к школе [Электронный ресурс]. URL: <http://www.partner-inform.de/partner/detail/2013/1/205/5791> (12.03.18).
5. Государственное казенное учреждение Калужской области «Школьный автобус» [Электронный ресурс]. URL: <http://schoolbuskaluga.ru/index.htm> (12.03.18).
6. Правила организованной перевозки группы детей в автобусе [Электронный ресурс]. URL: <http://ru-act.com/avtoyurist/pravila-organizovannoj-perevozki-gruppy-detej-v-avtobuse.html> (12.03.18).



7. ГОСТ Р 51160-98 Автобусы для перевозки детей. Технические требования. [Электронный ресурс]. URL: <http://vsegost.com/Catalog/90/9046.shtml>. (12.03.18).

8. Инструкция по охране труда при перевозке обучающихся, воспитанников автомобильным транспортом. [Электронный ресурс]. URL: <https://studfiles.net/preview/1191231/> (12.03.18).

9. Положение об обеспечении безопасности дорожного движения в предприятиях, учреждениях, организациях, осуществляющих перевозки пассажиров и грузов [Электронный ресурс]. URL: <http://legalacts.ru/doc/prikaz-mintransa-rf-ot-09031995-n-27/> (12.03.18).

10. Положение об организации специальных (школьных) перевозок учащихся [Электронный ресурс]. URL: <http://shkolnie.ru/sport/12475/index.html>. (12.03.18).

11. Сиволобов Н.М., Ширяев С.А., Гудков В.А., Раюшкина А.А. Проблемы и направления развития перевозок школьников в сельской местности [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sworld.com.ua/konfer29/754.pdf> (12.03.18).

12. Федеральный закон от 10.12.1995 № 196-ФЗ (ред. от 28.12.2013) "О безопасности дорожного движения" [Электронный ресурс]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156600/ (12.03.18).

13. Transportation of children and children's groups [Электронный ресурс]. URL: <http://miykvytok.com/en/faq/bus-tickets/transportation-of-passengers-in-buses/transportation-of-children-and-childrens-groups> (23.04.18).

14. Making It to the School – Improving Access to Learning through Educational and Transportation Policies for Children in South East Europe [Электронный ресурс]. URL:

<https://siteresources.worldbank.org/INTTRANSPORT/Resources/336291-1239112757744/5997693-1294344242332/Access-to-educationENG.pdf> (23.04.18).

15. Бутузова А.Б., Елфимова Н.А. Организация перевозки детей младшего школьного возраста автомобильным транспортом // Авиамашиностроение и транспорт: сб. статей IX Всерос. науч.-практ. конф. Иркутск, 2017. С. 297–301.

References

1. *Matias Laudanum. Svoj biznes: shkol'nyj avtobus* [Start-up: school bus]. Available at: <https://http://mylektsii.ru/14-24323.html>1. (accessed 12 March 2018).

<https://www.openbusiness.ru/biz/business/svoy-biznes-shkolnyy-avtobus/>

2. *Avtobusy Ameriki: shkol'nye* [American school buses]. Available at:

<http://www.gruzovikpress.ru/article/11187-obzor-avtobusnoy-otrasli-severnoy-ameriki-avtobusy-ameriki-shkolnye/> (accessed 12 March 2018).

3. *Pashutina N.A. Opyt organizatsii shkol'nyh perevozok spetsializirovannym passazhirskim transportom v Rossijskoj Federatsii* [Experience in the organization of school transportation by specialized passenger transport in the Russian Federation]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/opyt-organizatsii-shkolnyh-perevozok-spetsializirovannym-passazhirskim-transportom-v-rossijskoj-federatsii> (accessed 12 March 2018).

4. *Doroga k shkole* [Road to school]. Available at: <http://www.partner-inform.de/partner/detail/2013/1/205/5791> (accessed 12 March 2018).

5. *Gosudarstvennoe kazennoe uchrezhdenie Kaluzhskoj oblasti «Shkol'nyj avtobus»* [State public institution of the Kaluga region "School bus"]. Available at: <http://schoolbuskaluga.ru/index.htm> (accessed 12 March 2018).

6. *Pravila organizovannoj perevozki gruppy detej v avtobuse* [Rules for the organized transportation of a group of children by bus]. Available at: [http://ru-act.com/avtoyurist/pravila-organizovannoj-perevozki-](http://ru-act.com/avtoyurist/pravila-organizovannoj-perevozki-gruppy-detej-v-avtobuse.html)

gruppy-detej-v-avtobuse.html (accessed 12 March 2018).

7. *GOST R 51160-98 Avtobusy dlya perevozki detej. Tekhnicheskie trebovaniya* [GOST R 51160-98 Buses for transportation of children. Technical requirements]. Available at: <http://vsegost.com/Catalog/90/9046.shtml>. (accessed 12 March 2018).

8. *Instrukciya po ohrane truda pri perevozke obuchayushchihsya, vospitannikov avtomobil'nym transportom* [Occupational safety regulation under transportation of schoolchildren by motor transport]. Available at: <https://studfiles.net/preview/1191231/> (accessed 12 March 2018).

9. *Polozhenie ob obespechenii bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya v predpriyatiyah, uchrezhdeniyah, organizatsiyah, osushchestvlyayushchih perevozki passazhirov i грузов* [Regulation on road safety provision in enterprises, institutions and organizations engaged in passenger transportation and cargo shipping]. Available at: <http://legalacts.ru/doc/prikaz-mintransa-rf-ot-09031995-n-27/> (accessed 12 March 2018).

10. *Polozhenie ob organizatsii special'nyh (shkol'nyh) perevozok uchashchihsya* [Regulations on the organization of special (school) transportation of students]. Available at: <http://shkolnie.ru/sport/12475/index.html>. (accessed 12 March 2018).

11. *Sivolobov N.M., Shiryayev S.A., Gudkov V.A., Rayushkina A.A. Problemy i napravleniya razvitiya perevozok shkol'nikov v sel'skoj mestnosti* [Problems and development directions of schoolchildren transportation in rural areas]. Available at: <http://www.sworld.com.ua/konfer29/754.pdf> (accessed 12 March 2018).



12. *Federal'nyj zakon ot 10.12.1995 No. 196-FZ (red. of 28 December 2013) "O bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya"*. [Federal Law of 10 December 1995 No. 196-FZ (Edition of 28 December 2013) "On Road Safety"]. Available at:

http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_156600/ (accessed 12 March 2018).

13. Transportation of children and children's groups.

URL: <http://miykvytok.com/en/faq/bus-tickets/transportation-of-passengers-in-buses/transportation-of-children-and-childrens-groups> (accessed 23 April 2018).

14. Making It to the School – Improving Access to Learning through Educational and Transportation Poli-

cies for Children in South East Europe. URL:

<https://siteresources.worldbank.org/INTTRANSPORT/Resources/336291-1239112757744/5997693-1294344242332/Access-to-educationENG.pdf> (accessed 23 April 2018).

15. Butuzova A.B., Elfimova N.A. *Organizaciya perevozki detej mladshego shkol'nogo vozrasta avtomobil'nyim transportom* [Organization of primary school children transportation by motor transport]. *Aviamashinostroenie i transport: sb. statej IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Aircraft Engineering, Machine-Building and Transport: Collection of Articles of IX All-Russia Scientific and Practical Conference]. Irkutsk, 2017, pp. 297–301. (In Russian).

Критерии авторства

Бутузова А.Б., Елфимова Н.А. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Butuzova A.B., Elfimova N.A. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



МЕТОДИКА ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА НА ОСНОВЕ ANSYS ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ АЭРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЛА ПРИ ОТРЫВНОМ ОБТЕКАНИИ

© Ю.Ф. Вшивков¹, Е.А. Галушко², С.М. Кривель³

^{1,2,3}Иркутский государственный университет,

664003, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Карла Маркса, 1.

²Иркутский филиал Московского государственного технического университета гражданской авиации,
664047, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Коммунаров, 3.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ И МЕТОДЫ. Основная цель работы заключалась в создании методики определения кинематических параметров обтекания тела, при которых допустимо использовать стационарные подходы в расчете аэродинамических характеристик безотрывного и отрывного обтекания тел с использованием ANSYS, и параметров, когда необходимо использовать исключительно нестационарные подходы. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** В работе представлена методика выбора искомого значения аэродинамического коэффициента при отрывном обтекании с периодическим характером изменения параметров течения на основе теории случайных процессов. Методические положения продемонстрированы некоторыми результатами исследований аэродинамических характеристик крыльев (плоского квадратного в плане с тонким профилем и прямоугольного в плане с профилем NACA 23012). Рассмотрены особенности обтекания исследуемых объектов при различных углах атаки по отношению к набегающему потоку. Выполнена оценка достоверности моделирования в сравнении с экспериментальными данными. На основе анализа физических картин обтекания тел и результатов расчета его аэродинамических характеристик разработан алгоритм действий (методика) по определению диапазонов кинематических параметров обтекания решения задач в стационарной и нестационарной постановках. **ВЫВОДЫ.** Представленные результаты позволяют оценить возможности применения ANSYS при решении задач аэродинамики с учетом отрыва потока и выбора модели обтекания (стационарная или нестационарная) и выполнять с достаточной достоверностью аэродинамические расчеты крыльев и других тел с учетом отрыва потока.

Ключевые слова: ANSYS, аэродинамические характеристики крыла, отрыв потока, срыв потока, отрывное обтекание, вычислительная аэродинамика, нелинейные аэродинамические характеристики.

Информация о статье. Дата поступления 22 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 22 июня 2018 г.; дата онлайн-размещения 31 июля 2018 г.

Формат цитирования. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Методика вычислительного эксперимента на основе ANSYS по определению аэродинамических характеристик тела при отрывном обтекании // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 208–222. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-208-222

ANSYS-BASED METHODOLOGY OF THE COMPUTATIONAL EXPERIMENT ON BODY AERODYNAMIC CHARACTERISTICS DETERMINATION AT DETACHED FLOW

Yu.F. Vshivkov, E.A. Galushko, S.M. Krivel

¹Вшивков Юрий Федорович, аспирант, научный сотрудник ИГУ, e-mail: 1988ufv@mail.ru

Yuriy F. Vshivkov, Postgraduate student, Researcher at Irkutsk State University, e-mail: 1988ufv@mail.ru

²Галушко Егор Александрович, аспирант Иркутского государственного университета, преподаватель Иркутского филиала МГТУ ГА, e-mail: photon_91@mail.ru

Egor A. Galushko, Postgraduate student at Irkutsk State University, Lecturer of the Irkutsk branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation, e-mail: photon_91@mail.ru

³Кривель Сергей Михайлович, доцент кафедры математического анализа и дифференциальных уравнений Института математики, экономики и информатики, e-mail: krivel66@mail.ru

Sergey M. Krivel, Associate Professor of the Department of Mathematical Analysis and Differential Equations of the Institute of Mathematics, Economics and Informatics of Irkutsk State University, e-mail: krivel66@mail.ru



Irkutsk State University,
1, Karl Marx St., Irkutsk, 664003, Russian Federation
Irkutsk branch of Moscow State Technical University of Civil Aviation,
3, Kommunarov St., Irkutsk, 664047, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE AND METHODS. The main purpose of the work is to create a methodology for determining the kinematic parameters of body flow which allow to use the stationary approaches for the calculation of aerodynamic characteristics of attached and detached body flow using ANSYS and parameters when it is necessary to use non-stationary approaches only. **RESULTS.** The paper presents a technique for choosing the required value of the aerodynamic coefficient for detached flow with a periodic character of flow parameter variation based on the theory of random processes. Methodological provisions are demonstrated by some research results of aerodynamic characteristics of wings (flat square in the planform with a thin profile and rectangular in the planform with the profile NACA 23012). Consideration is given to the features of the flow around the objects under investigation at different angles of attack relating to the main flow. Modeling reliability is estimated in comparison with experimental data. Based on the analysis of physical flow patterns of bodies and calculation results of their aerodynamic characteristics an algorithm (methodology) for determining the ranges of kinematic parameters of flow around has been developed for the solution of problems in stationary and nonstationary formulations. **CONCLUSIONS.** The presented results allow to evaluate the application capabilities of ANSYS when solving aerodynamic problems taking into account the flow separation and the selection of the flow model (stationary or non-stationary) as well as to carry out sufficiently reliable aerodynamic calculations of wings and other bodies considering flow separation.

Keywords: ANSYS, aerodynamic characteristics of the wing, flow separation, flow stall, detached flow, computational aerodynamics, nonlinear aerodynamic characteristics

Information about the article. Received April 22, 2018; accepted for publication June 22, 2018; available online July 31, 2018.

For citation. Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Krivel S.M. ANSYS-based methodology of the computational experiment on body aerodynamic characteristics determination at detached flow. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 208–222. DOI: R10.21285/1814-3520-2018-7-208-222 (In Russian).

Введение

В процессе обтекания тела (летательного аппарата и его частей) на его поверхности могут образовываться зоны отрыва (срыва) потока, что приводит к существенному изменению аэродинамических характеристик элементов и летательного аппарата в целом. В зонах отрыва потока параметры течения непостоянны и изменяются с течением времени. Интенсивный отрыв потока, как правило, сопровождается ярко выраженным периодическим изменением характера обтекания тела и, следовательно, соответствующим изменением аэродинамических характеристик. Отрыв потока реализуется при достижении вполне определенных кинематических параметров набегающего потока на тело (движения тела в потоке) или изменений в форме тела. Например, отрыв потока наблюдается при превышении углов атаки или скольжения начала отрыва, при превышении вполне определенных угловых скоростей враще-

ния летательного аппарата, при отклонении рулевых и стабилизирующих поверхностей на значительные углы по отношению к набегающему потоку, при наличии плохо обтекаемых элементов в составе компоновки летательного аппарата и т.д.

В последнее время в связи со значительным прогрессом в области вычислительной техники и вычислительной гидрогазодинамики широкое распространение для решения задач аэродинамики получили компьютерные системы конечно-элементного анализа, например, ANSYS (CFD и FLUENT) [1], OpenFOAM [2], элементы которых позволяют решать задачи обтекания различных тел при самых разнообразных условиях и параметрах обтекания, в том числе и при наличии отрыва потока. На основе данных программных продуктов выполнено достаточно большое количество исследований по выбору методики расчета и исследования параметров от-



рывного обтекания [3–11]. Однако в приведенных работах исследуется в основном влияние параметров расчетной сетки и граничных условий на поверхностях, производится выбор подходящей модели турбулентности, изучаются структуры вихревых и других образований. Вопрос о выборе стационарной или нестационарной модели аэродинамики остается открытым и требует принятия субъективного решения на уровне задания данных и условий расчета.

Указанная проблема особенно актуальна для задач аэродинамики при неизменных (постоянных по времени) параметрах набегающего потока. Строго говоря, обтекание любого тела с наличием зон турбулентного течения (турбулентного пограничного слоя, зон «донного» течения и т.п.) или зон отрыва потока является нестационарным. Однако в ряде случаев нестационарностью параметров потока в указанных зонах течения пренебрегают. Такой подход допустим в случаях, когда общая картина обтекания достаточно устойчива и не имеет ярко выраженного периодического характера изменения по времени или когда нестационарность течения в локальных ограниченных размерами областях не оказывает значительного влияния на аэродинамические характеристики тела в целом. В последнем случае целесообразно решение задачи в стационарной постановке, поскольку этим снижаются вычислительные затраты получения результата. Если же, например, отрыв потока приводит к существенному изменению параметров течения

и, следовательно, аэродинамических характеристик по времени, то очевидно, что задачу необходимо решать в нестационарной постановке.

Таким образом, определение областей кинематических параметров набегающего потока, в которых допустимо решение задачи обтекания в стационарной постановке или необходимо применить нестационарную модель вычислительной аэродинамики, является неременным этапом решения задач исследования аэродинамики тел методами вычислительного эксперимента, например, с использованием ANSYS. Исследование аэродинамики тел в условиях отсутствия или недостатка априорной информации о режимах их обтекания требует разработки методики определения указанных областей кинематических параметров набегающего потока. Кроме того, в случае нестационарного характера изменения какой-либо аэродинамической характеристики (например, коэффициента подъемной силы c_{ya}) по времени при постоянных кинематических параметрах движения тела в потоке необходимо обосновать и задать правило выбора «усредненного» значения этой характеристики.

Решению указанных смежных задач посвящена настоящая работа. В качестве демонстрационного объекта исследования использовано крыло летательного аппарата, в качестве параметра, определяющего наличие отрыва потока и характер обтекания (постановку решения задачи), выбран угол атаки α .

Общая характеристика методики

Известно, что отрыв потока оказывает существенное влияние на коэффициент подъемной силы крыла c_{ya} . По графической зависимости коэффициента подъемной силы c_{ya} от угла атаки α можно качественно определить углы атаки, на которых реализуется отрыв потока. Поэтому коэффициент c_{ya} используется в качестве индикатора наличия и интенсивности отрыва

потока, а угол атаки α – в качестве параметра, определяющего факт наличия отрыва потока и его интенсивность.

Задается диапазон углов атаки α , который заведомо перекрывает диапазон от начального угла атаки до углов атаки, на которых реализуется нестационарное отрывное обтекание. Выполняется расчет c_{ya} в стационарной и нестационарной постановках в данном диапазоне (рис. 1). На



основе анализа результатов вычислительного эксперимента (соответствия полученной картины обтекания физической сущности моделируемых явлений и различий в результатах расчета в стационарной и нестационарной постановках) определяется угол атаки α^* . Для углов атаки $\alpha < \alpha^*$ расчеты выполняются в стационарной постановке, а для углов атаки $\alpha > \alpha^*$ расчеты необходимо выполнять исключительно в нестационарной постановке.

В случае нестационарного обтекания при фиксированном угле атаки α и постоянной скорости набегающего потока V зависимость коэффициента подъемной силы c_{ya} от времени t может рассматриваться как случайная функция в зависимости от времени t (рис. 2). В этом случае к определению характеристик коэффициента

подъемной силы c_{ya} как изменяющейся во времени t случайным образом величины может быть применен соответствующий математический аппарат описания случайных процессов⁴ [12]. Для определения усредненной по времени величины коэффициента подъемной силы c_{ya} и характеристик ее разброса принимаем допущение, что на выделенном участке времени ΔT функция $c_{ya}(t)$ представляет собой стационарный случайный процесс.

Закон изменения скорости потока задавался следующим образом:

$$V(t) = \begin{cases} t < 0, & V = 0; \\ t \geq 0, & V = \text{const.} \end{cases}$$

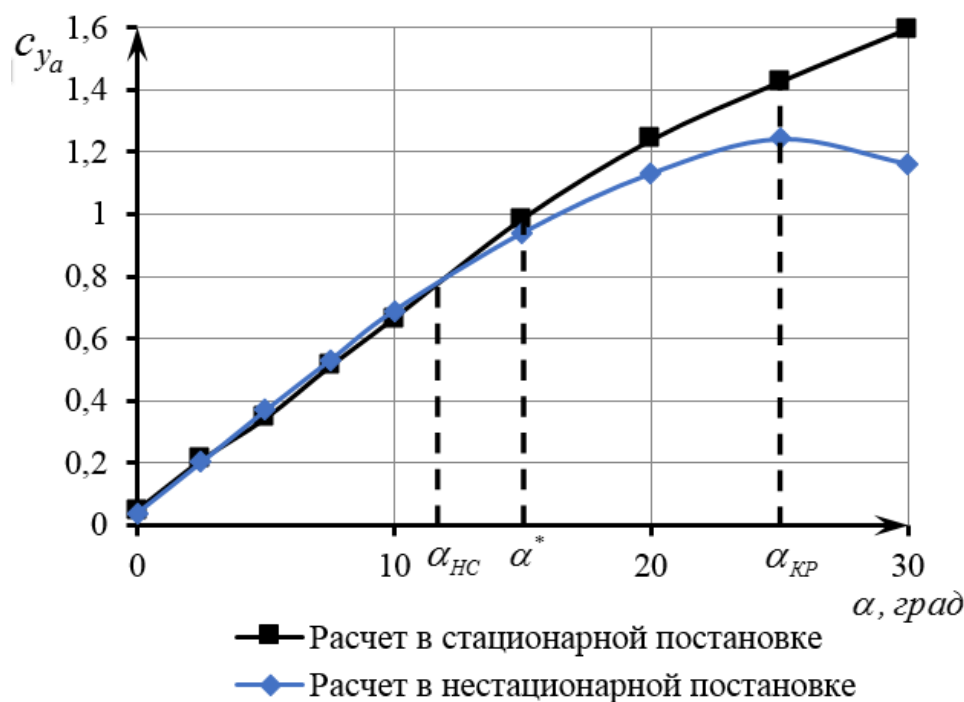


Рис. 1. Зависимость коэффициента подъемной силы c_{ya} от угла атаки α
(α_{HC} – угол начала срыва потока; α_{KP} – критический угол атаки)
Fig. 1. Dependence of the lift force coefficient c_{ya} on the angle of attack α
(α_{HC} – burble angle; α_{KP} – angle of stall)

⁴Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2000. 383 с. / Ventsel E.S., Ovcharov L.A. Theory of random processes and its engineering applications. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 2000, 383 p.

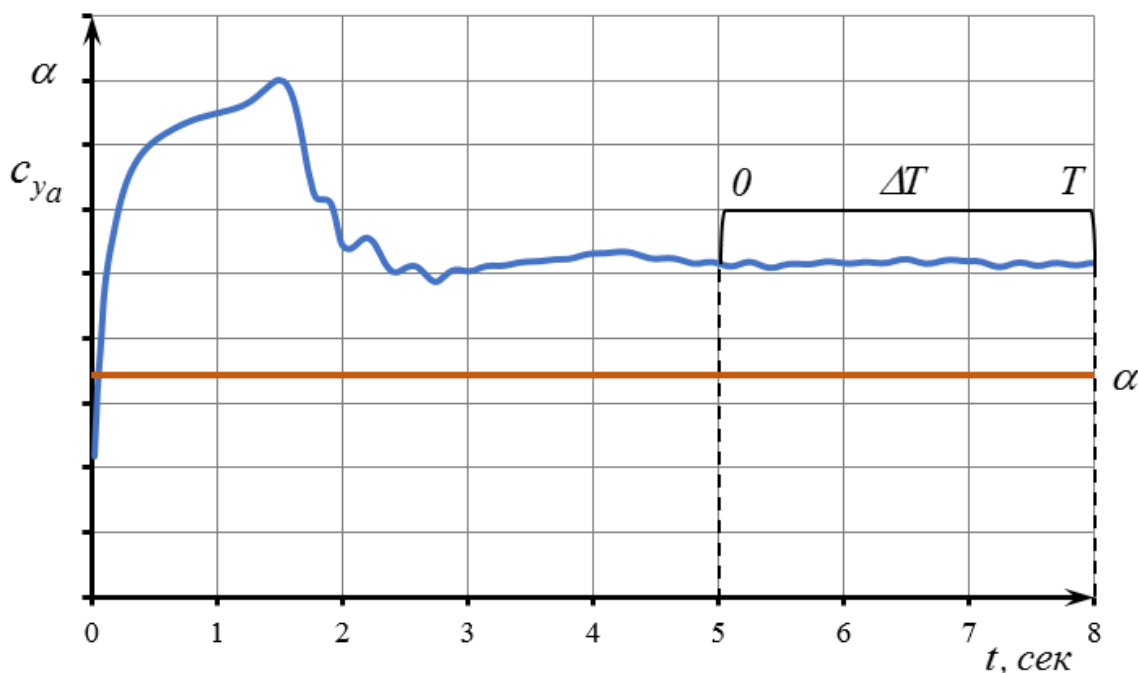


Рис. 2. График изменения коэффициента подъемной силы c_{ya} от времени t при постоянном кинематическом параметре α

Fig. 2. Graph of lift force coefficient c_{ya} variation depending on time t at the constant kinematic parameter α

Поскольку предполагается, что процесс изменения коэффициента подъемной силы c_{ya} является случайным стационарным процессом, который обладает свойством эргодичности и протекает однородно по времени t , естественно предположить, что его единственная реализация определенной продолжительности может служить достаточным опытным материалом для получения требуемых характеристик, таких как математическое ожидание, дисперсия случайного процесса и среднее квадратичное отклонение (рис. 3).

Применительно к поставленной задаче формулы для расчета указанных характеристик имеют вид:

$$\bar{c}_{ya} = M[c_{ya}(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T c_{ya}(t) dt,$$

$$D_{c_{ya}} = D[c_{ya}(t)] = \frac{1}{T} \int_0^T (c_{ya}(t) - \bar{c}_{ya})^2 dt,$$

$$\sigma_{c_{ya}} = \sqrt{D_{c_{ya}}},$$

где $\bar{c}_{ya}$ – математическое ожидание;
 $D_{c_{ya}}$ – дисперсия случайного процесса;
 $\sigma_{c_{ya}}$ – среднее квадратичное отклонение;
 T – конечное значение времени на интервале ΔT , на котором рассматривается стационарная случайная функция $c_{ya}(t)$.

В случае численной реализации знак интеграла заменяется конечной суммой, в результате чего формулы преобразуются к следующему виду:

$$\bar{c}_{ya} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N c_{ya_i},$$

$$D_{c_{ya}} \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (c_{ya_i} - \bar{c}_{ya})^2,$$

$$\sigma_{c_{ya}} = \sqrt{D_{c_{ya}}}.$$

Здесь N – количество промежутков времени на участке ΔT , для которых определялись значения функции $c_{ya}(t)$.

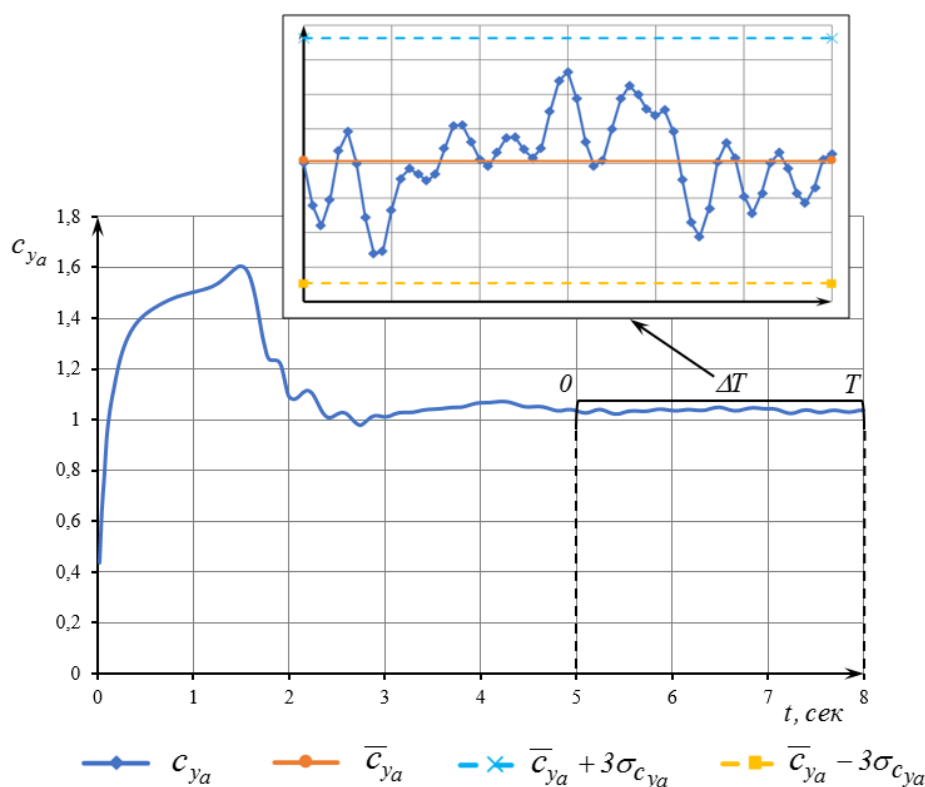


Рис. 3. Определение усредненного коэффициента подъемной силы c_{ya} по времени t и характеристик его разброса

Fig. 3. Determination of the averaged lift force coefficient c_{ya} and its spread characteristics based on time t

Объект исследования

Объект исследования – плоское прямоугольное в плане крыло удлинением $\lambda=1$ с тонким профилем [13–15]. Особенностью данного крыла является то, что уже на небольших углах атаки на верхней поверхности начинается отрыв потока, что является важным с точки зрения поставленной задачи. В соответствии с условиями физического эксперимента, изложенными в работе [14], построена математическая модель аэродинамической трубы и самого крыла в ANSYS.

Геометрическая модель крыла помещена в специально смоделированное ограниченное пространство в виде канала прямоугольного сечения, фактически представляющего собой модель аэродинамической трубы, где $OX_aY_aZ_a$ – скоростная, а $OXYZ$ – связанная системы координат (рис. 4). Плоскости I и II представляют со-

бой поверхности входа потока в расчетное пространство и выхода из него соответственно. В плоскости I задано граничное условие «inlet» – величина нормальной составляющей скорости потока по отношению к поверхности. Этим фактически задается расход рабочего тела (воздуха) через сечение на входе в модель «трубы». Скорость невозмущенного потока задавалась реальной из условий эксперимента – 40 м/с. На поверхности II задано граничное условие «outlet». Данная поверхность является выходом рабочего тела из аэродинамической трубы, на ней реализовано условие свободного выхода потока с расходом, равным общему расходу потока на всех входах в расчетную область (в данном случае через поверхность I). На поверхности III было задано граничное условие «зеркального» отображения картины обтекания. В этом случае моделируется тече-



ние только в окрестности половины крыла относительно плоскости симметрии с учетом влияния потока в «зеркально» отраженной части крыла на уровне формирования уравнений течения рабочего тела. На оставшихся трех стенках задано граничное условие «moving wall» – подвижная поверхность, скорость перемещения которой задается равной скорости потока на входе в трубу (скорости «полета» тела или скорости невозмущенного потока). Для поверхности крыла было выбрано граничное условие «wall» – твердая непроницаемая поверхность, в качестве материала стенки – алюминиевый сплав.

Сетка задана в виде конечных элементов (тетраэдров). Наименьший размер элементов сетки был задан на поверхности модели тела, относительные размеры элементов сетки на поверхности тела – не более 0,003. Максимальное число конечных элементов сетки достигало почти 5 миллионов.

С учетом рекомендаций разработчиков ANSYS и авторов работ [16, 17] для решения задачи моделирования процесса обтекания целесообразно использовать

модель турбулентности $k-\varepsilon$, поскольку она с достаточной степенью точности позволяет определить значения аэродинамических характеристик и описывает характер процесса обтекания объекта с высокой достоверностью. Результат моделирования процесса обтекания крыла при различных моделях турбулентности с использованием нестационарной модели обтекания представлен на рис. 5.

На основе модели турбулентности $k-\varepsilon$ выполнены методические исследования по определению наличия зон отрыва потока в случае стационарной и нестационарной модели обтекания плоского прямоугольного крыла. Результаты сравнительного анализа полученных аэродинамических характеристик представлены на рис. 6.

Из представленных зависимостей видно, что удовлетворительное совпадение коэффициентов подъемной силы c_{ya} наблюдается до угла атаки $\alpha = 20^\circ$, а на промежутке от 20 до 30° наблюдается значительное расхождение данных расчетов в случае использования стационарной и нестационарной модели обтекания.

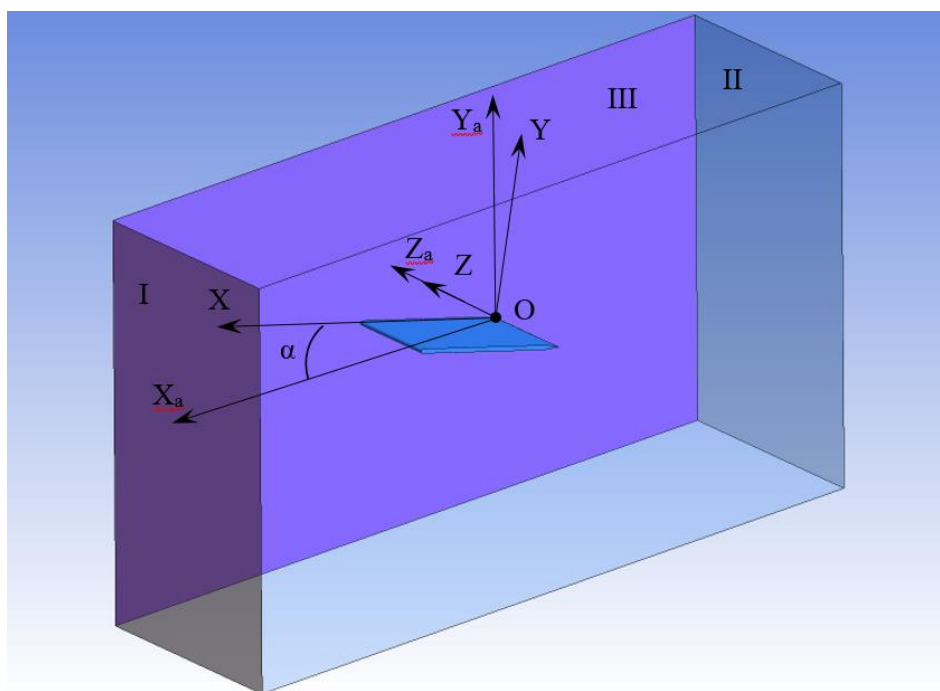


Рис. 4. Модель крыла малого удлинения в аэродинамической трубе
Fig. 4. Model of the low-aspect ratio wing in the wind tunnel

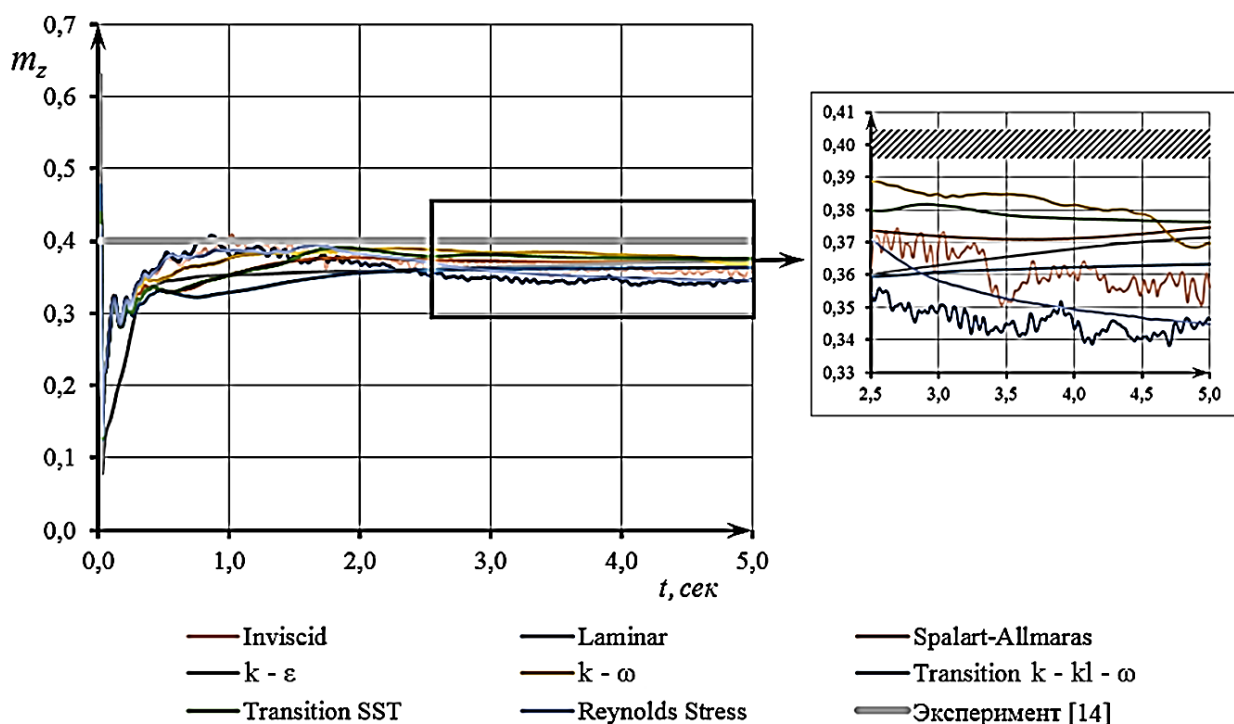


Рис. 5. Зависимость коэффициента продольного момента m_z при угле атаки $\alpha = 15^\circ$ от времени t для различных моделей турбулентности
Fig. 5. Dependence of the pitching-moment coefficient m_z at the angle of attack $\alpha = 15^\circ$ on time t for various models of turbulence

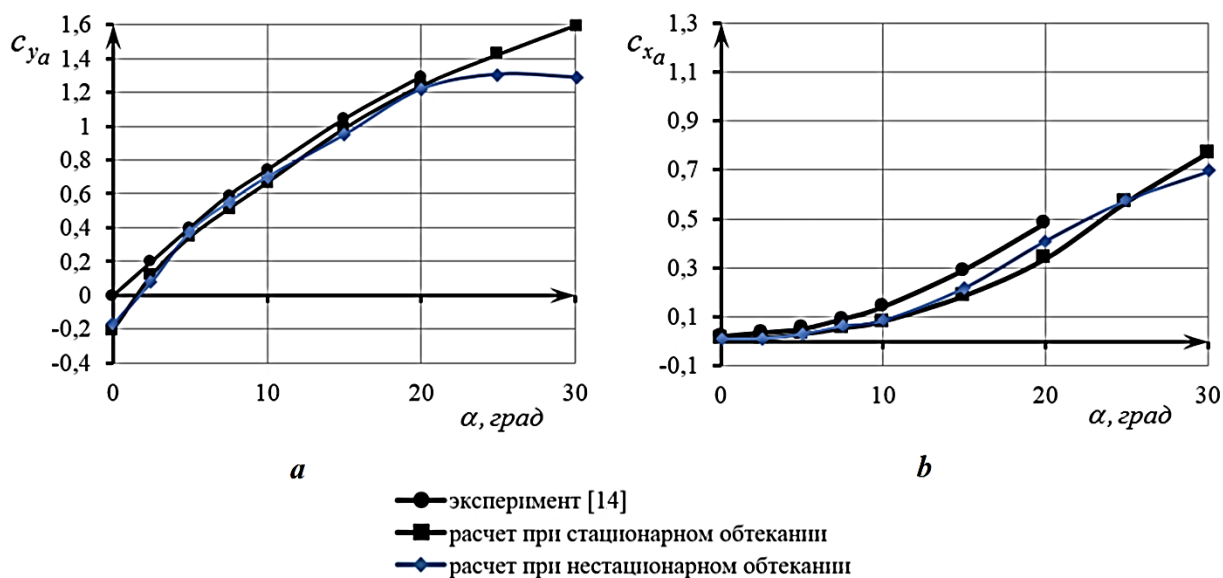
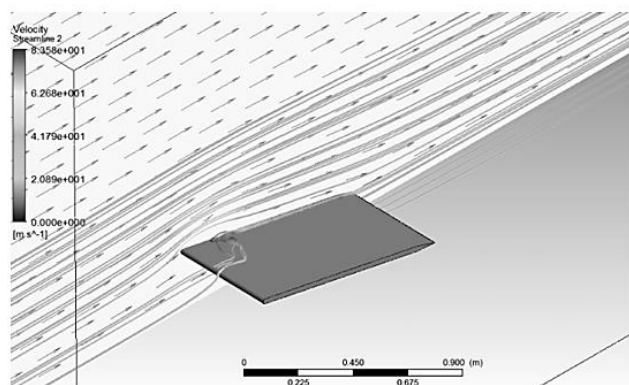


Рис. 6. Аэродинамические характеристики плоского крыла:
а – зависимость коэффициента подъемной силы c_{y_a} от угла атаки α ;
б – зависимость коэффициента лобового сопротивления c_{x_a} от угла атаки α
Fig. 6. Aerodynamic characteristics of a flat-plate airfoil:
а – dependence of the lift force coefficient c_{y_a} on the angle of attack α ;
б – dependence of the drag coefficient c_{x_a} on the angle of attack α

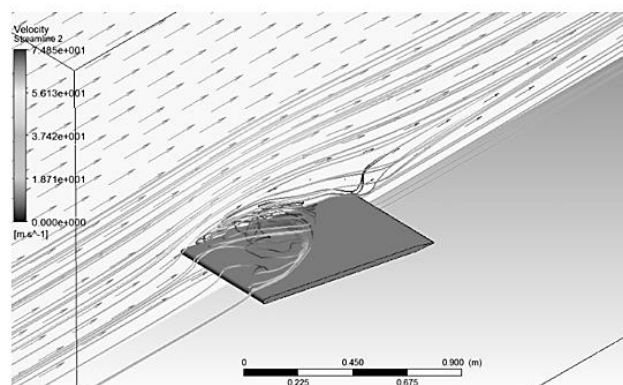


ANSYS предоставляет широкие возможности по визуализации происходящих процессов. Для анализа физической картины обтекания крыла используются поля векторов местной скорости, а также линии тока. Направление построения линий тока задается как по направлению потока, так и против него с целью выявления особенностей обтекания. Анализ показал, что при угле атаки $\alpha = 11,5^\circ$ (рис. 7, а) в случае использования стационарной модели обтекания на верхней поверхности крыла образуется участок с наличием небольшой зоны отрыва потока. При построении картины обтекания для того же угла атаки в случае использования нестационарной модели обтекания (рис. 7, б) видно, что на верхней поверхности крыла образуется зо-

на отрыва потока большего размера, чем та, что показана на рисунке 7, а. Также можно отметить, что образующийся вихрь затягивает в себя часть потока практически с самой законцовки крыла (рис. 7, б). Полученное совпадение результатов расчетов говорит о том, что образующийся вихрь в данном случае не оказывает существенного влияния на характер изменения аэродинамических параметров ввиду своей малой интенсивности. Однако при угле атаки $\alpha = 20^\circ$ и выше образуется зона с интенсивным отрывом потока, что сказывается на характере изменения аэродинамических параметров и существенном расхождении результатов расчета в случае стационарной и нестационарной модели обтекания (рис. 8).



a



b

**Рис. 7. Направление линий тока и векторов скоростей при угле атаки $\alpha = 11,5^\circ$:
а – в стационарной постановке; б – в нестационарной постановке**
**Fig. 7. Direction of streamlines and velocity vectors at the angle of attack $\alpha = 11.5^\circ$:
a – in stationary setting (steady); b – in nonstationary setting (transient)**

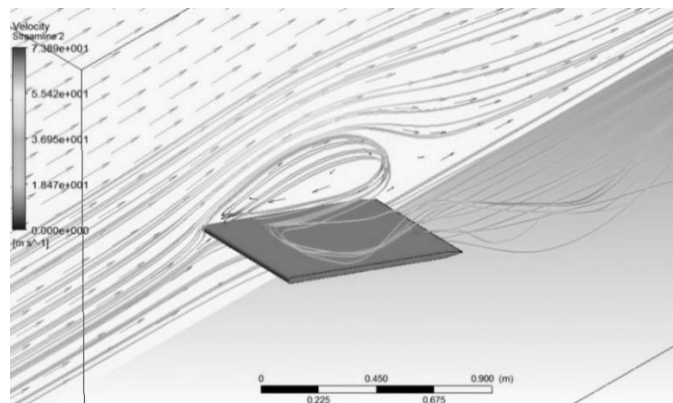


Рис. 8. Картина установившегося вихря при угле атаки $\alpha = 20^\circ$
Fig. 8. Picture of the steady vortex at the angle of attack $\alpha = 20^\circ$



Кроме этого следует отметить, что стационарная модель обтекания не позво-

ляет определить критический угол атаки $\alpha_{кр}$, который равен $\sim 25^\circ$ (см. рис. 6, а).

Оценка значения аэродинамических характеристик при нестационарном обтекании

Для подтверждения полученных результатов был выполнен сравнительный анализ моделирования круговой обдувки профиля NASA 23012 с экспериментальными данными [18].

Круговая обдувка профиля NASA 23012 выполнялась на модели прямоугольного крыла. Размеры модели: 1,8 м – по размаху, 0,3 м – по хорде. Концы модели были скруглены по способу, принятому в ЦАГИ: радиус скругления равнялся половине толщины профиля в данном месте хорды. Удлинение модели было равно шести ($\lambda = 6$). Аэродинамическая труба круглого сечения диаметром $D = 2,6$ м и длиной $L = 4$ м (рис. 9). Скорость невозмущенного потока составила 41,3 м/с. Граничные условия и модель среды аналогичны модели с плоским крылом.

На рис. 10 приведена зависимость

c_{y_a} , c_{x_a} , m_z от угла атаки α . Для данной модели расчеты выполнялись в случае стационарной модели обтекания до угла атаки $\alpha = 15^\circ$. При угле атаки $\alpha = 16^\circ$ на верхней поверхности крыла образовывался вихрь, который приводил к периодическому характеру изменения аэродинамических характеристик, в связи с чем расчет выполнялся для нестационарной модели обтекания. Из полученных зависимостей видно, что результат физического эксперимента и моделирования в ANSYS имеет достаточно высокое совпадение даже на углах атаки с интенсивным срывом потока.

На рис. 11 показано, как при изменении угла атаки меняется картина обтекания. Видно, что картины обтекания соответствуют характеру изменения аэродинамических параметров.

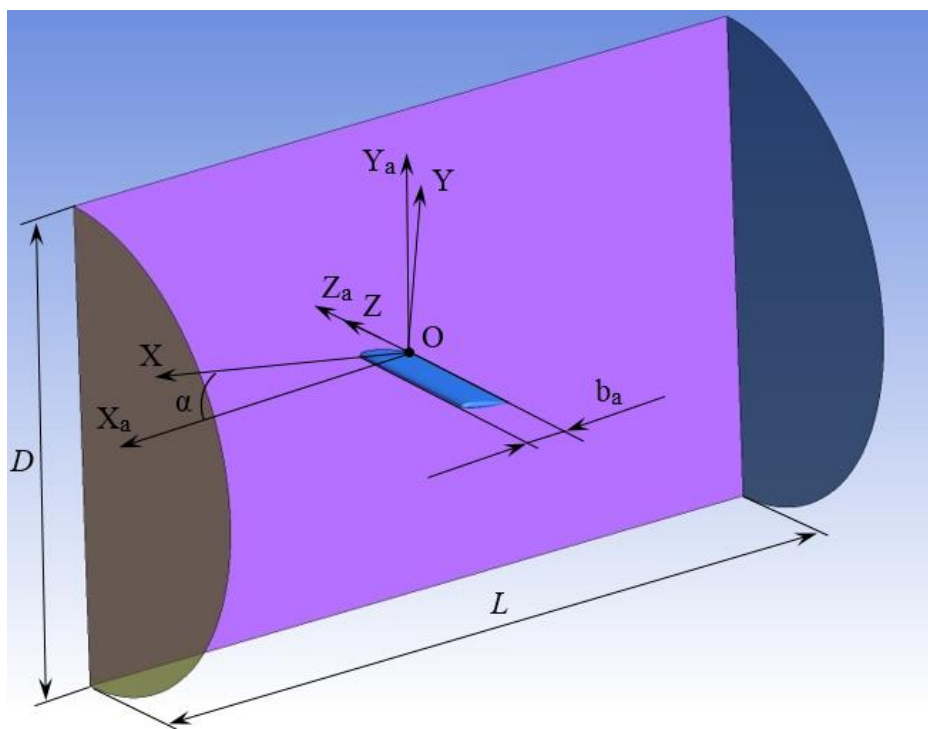


Рис. 9. Модель крыла в аэродинамической трубе
Fig. 9. Model of a wing in a wind tunnel

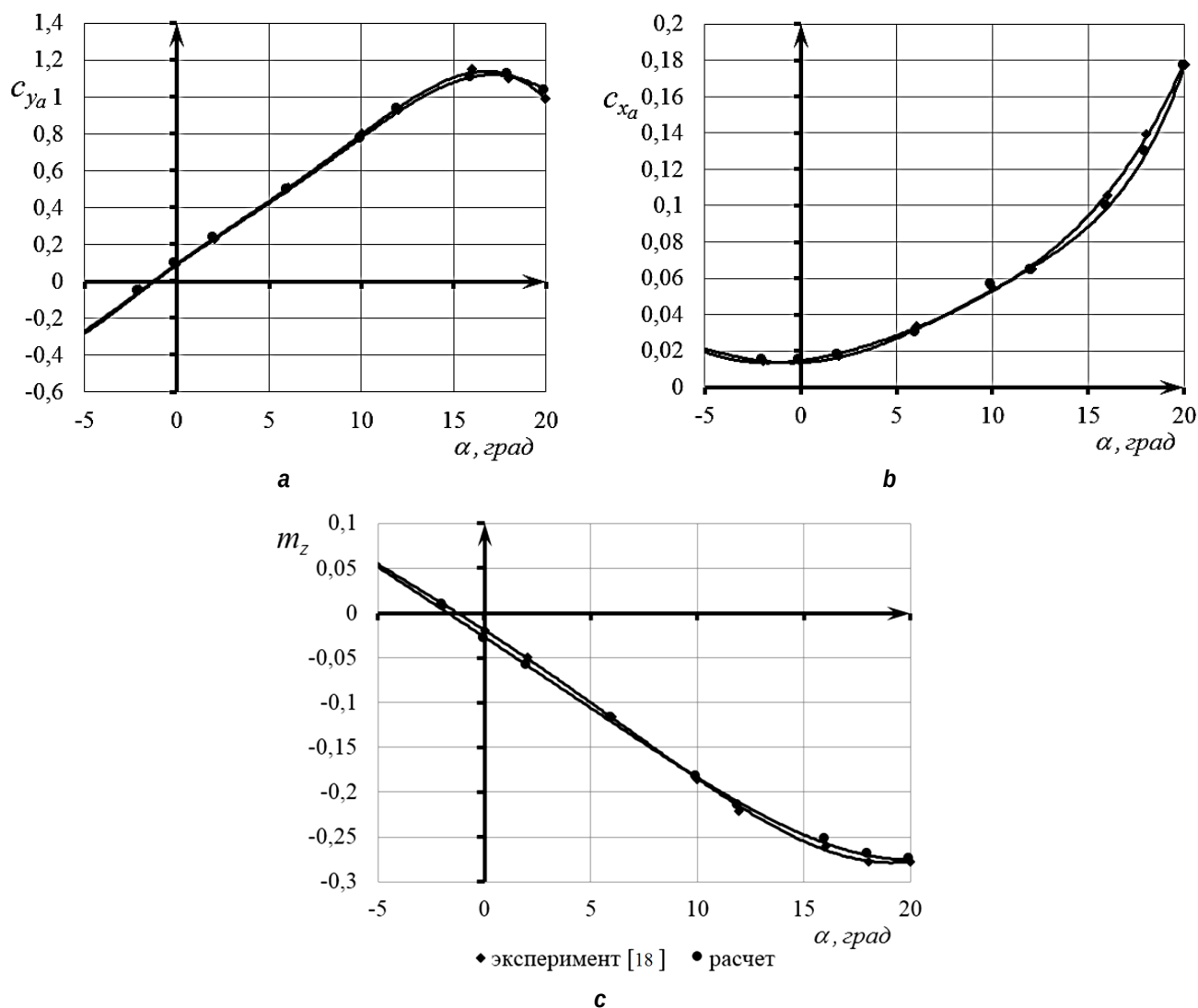


Рис. 10. Аэродинамические характеристики профиля NACA 23012 при углах атаки $\alpha = -5-20^\circ$:

a – зависимость коэффициента подъемной силы c_{y_a} от угла атаки α ;

b – зависимость коэффициента лобового сопротивления c_{x_a} от угла атаки α ;

c – зависимость коэффициента продольного момента m_z от угла атаки α

Fig. 10. Aerodynamic characteristics of the profile NACA 23012 at the angles of attack $\alpha = -5-20^\circ$:

a – dependence of the lift force coefficient c_{y_a} on the angle of attack α ;

b – dependence of the drag coefficient c_{x_a} on the angle of attack α ;

c – dependence of the pitching-moment coefficient m_z on the angle of attack α

Условия физического эксперимента предполагали обдувку профиля до угла $\alpha = 180^\circ$. Как видно из графиков, представленных на рис. 12, 13, при углах атаки $\alpha \geq 30^\circ$ существует значительное расхождение между результатами расчета и физическим экспериментом. Характеристики

оборудования, используемого в ходе физического эксперимента, методика измерений и порядок обработки экспериментальных данных в работе [18] не приводятся, что не дает возможности обеспечить единство подходов в физическом и вычислительном экспериментах.

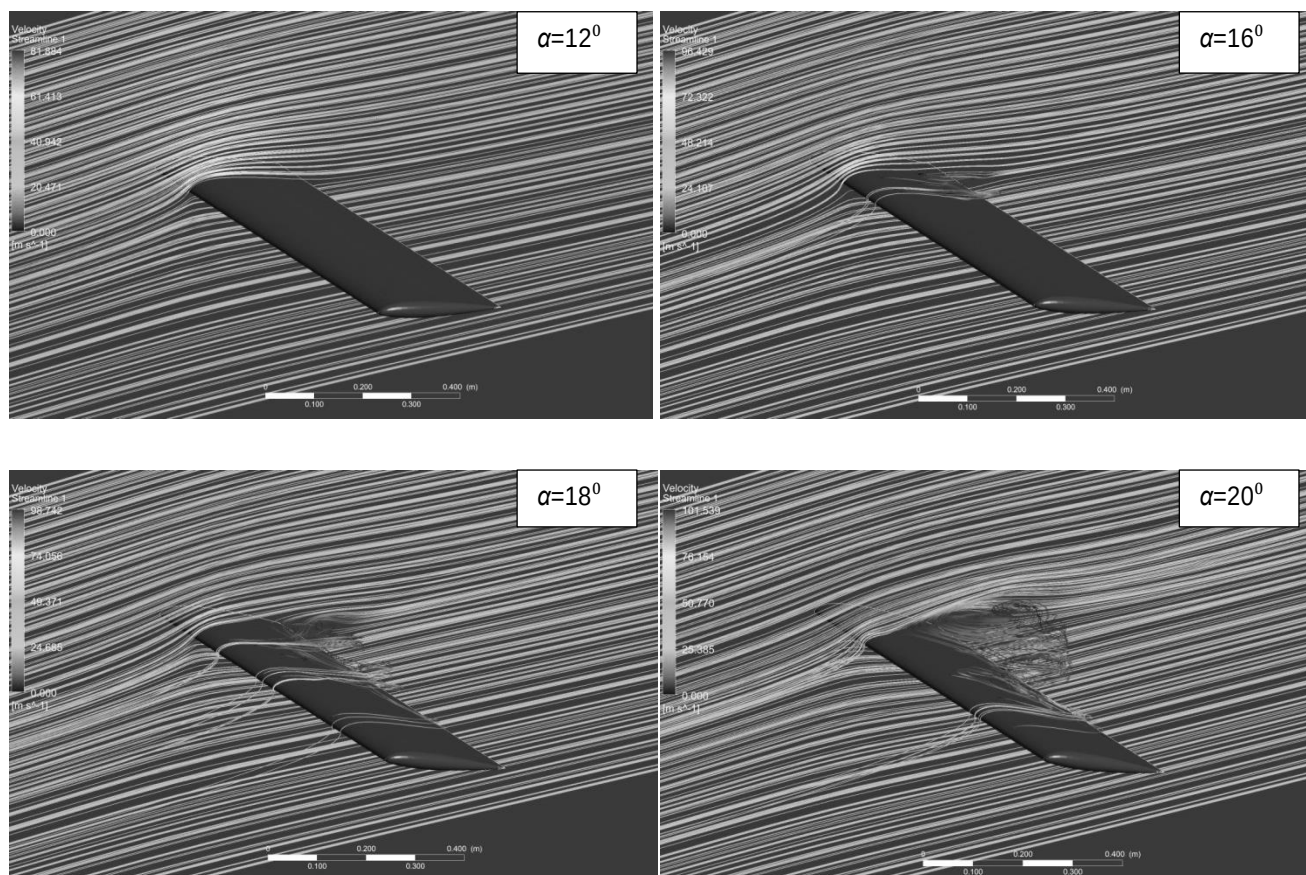


Рис. 11. Изменение картины обтекания с увеличением угла атаки α
Fig. 11. Flow pattern variation due to the increased angle of attack α

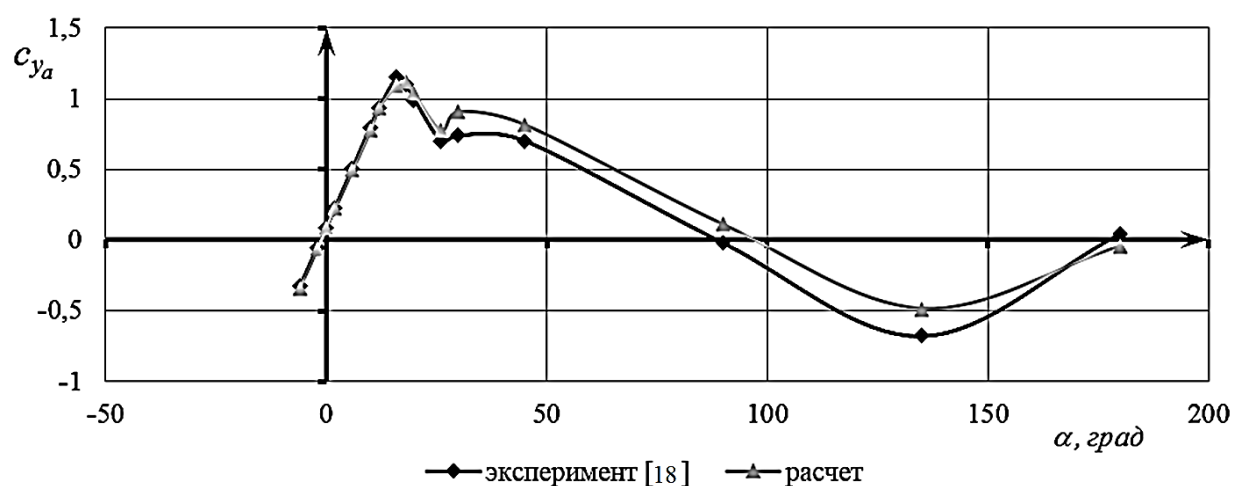


Рис. 12. Зависимость коэффициента подъемной силы c_{y_a} от угла атаки $\alpha = -5-180^\circ$
профиля NACA 23012
Fig. 12. Dependence of the lift force coefficient c_{y_a} on the angle of attack $\alpha = -5-180^\circ$
of the profile NACA 23012

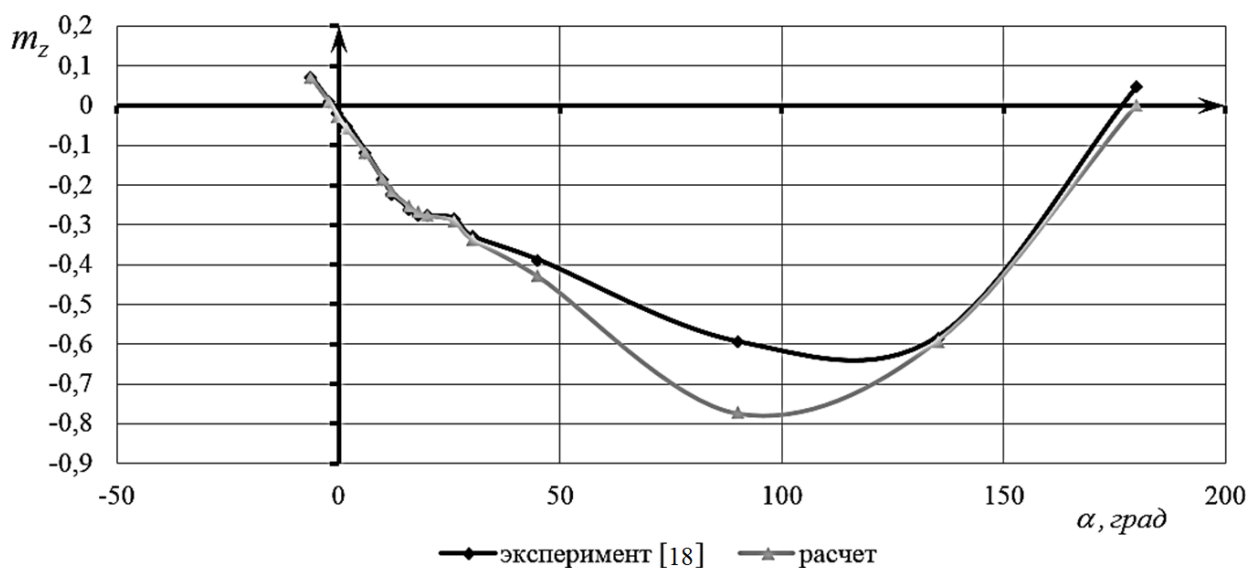


Рис. 13. Зависимость коэффициента продольного момента m_z от угла атаки $\alpha = -5-180^\circ$ профиля NACA 23012

Fig. 13. Dependence of the pitching-moment coefficient m_z on the angle of attack $\alpha = -5-180^\circ$ of the profile NACA 23012

Заключение

Рассмотренная методика позволяет с достаточной достоверностью определить угол атаки α , при котором образовавшийся отрыв потока оказывает существенное влияние на значения аэродинамических характеристик. Нахождение данного угла атаки α позволит в дальнейшем перейти к массовым расчетам с обеспечением при-

емлемой достоверности получаемых результатов, сократит временные затраты, поскольку до данного угла атаки можно будет выполнять расчет в стационарной постановке, время расчета в этом случае уменьшается в несколько раз в отличие от нестационарной постановки.

Библиографический список

1. ANSYS. Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ansys.com> (21.02.2018).
2. OpenFOAM. Официальный сайт [Электронный ресурс]. URL: <https://www.openfoam.com> (21.02.2018).
3. Головнев А.В., Тарасов А.Л. Исследование аэродинамических характеристик модели маневренного самолета с механизированной передней кромкой крыла с помощью программного комплекса ANSYS FLUENT // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 218. С. 42–49. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2015-218-42-49>
4. Молочиков В.М., Михеев Н.И., Душина О.А. Исследование применимости пакета FLUENT к моделированию дозвуковых отрывных течений // Теплофизика и аэродинамика. 2009. Т. 16. № 3. С. 387–394.
5. Вожаев В.В., Косушкин К.Г., Миргазов Р.М. Рас-

- чет аэродинамических характеристик крыла с профилем САНР в условиях естественного ламинарно-турбулентного перехода // Научный вестник МГТУ ГА. 2013. № 188. С. 92–98.
6. Калугин В.Т., Голубев А.Г., Елихин А.С., Мичкин А.А. Возможности применения открытого пакета OPENFOAM для численного моделирования отрывных течений при до- и сверхзвуковых скоростях обтекания летательных аппаратов // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. МГТУ ГА 2014. № 199. С. 23–30.
7. Бобарика И.О., Гусев И.Н. Численное моделирование аэродинамики несущих элементов летательных аппаратов потоком несжимаемой жидкости при малых числах Маха // Научные труды (Вестник МАТИ). 2013. № 21 (93). С. 59–65.
8. Братусь С.Ю., Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А.,



Гусев И.Н., Кривель С.М. Аэродинамические особенности и характеристики компоновок экраноплана схем «утка» и «тандем» // Вестник ИрГТУ. 2016. № 5. С. 168–180. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-168-180>

9. Ke J.H., Edwards J. R. Numerical Simulations of Turbulent Flow over Airfoils Near and During Static Stall // Journal of Aircraft. 2017. Vol. 54. No. 5. P. 1960–1978.

10. Hisham Shehata, Mohamed Zakaria, Ahmed Hussein, Muhammad R. Hajj. Aerodynamic Analysis of Flapped Airfoil at High Angles of Attack // 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum. <https://doi.org/10.2514/6.2018-0037>

11. Dhamankar N.S., Blaisdell G.A., Lyrintzis A.S. Overview of Turbulent Inflow Boundary Conditions for Large-Eddy Simulations // AIAA Journal. 2017. Vol. 56. No. 35. P. 1–18. (<https://doi.org/10.2514/1.J055528>).

12. Вентцель Е.С. Теория вероятности. 4-е изд., стер. М.: Наука, 1969. 576 с.

13. Белоцерковский С.М., Ништ М.И. Отрывное и безотрывное обтекание тонких крыльев идеальной жидкостью. М.: Наука, 1978. 352 с.

14. Холявко В.И., Усик Ю.Ф. Аэродинамические характеристики частей летательных аппаратов вблизи

земли и в ограниченных потоках // Влияние формы в плане на аэродинамические характеристики крыла малого удлинения в ограниченном потоке: отчет по НИР, номер государственной регистрации 78075544. Ч. 2. Харьков: Харьковский авиационный институт, 1980. 80 с.

15. Вшивков Ю.Ф., Галушко Е.А., Кривель С.М. Комплексная оценка достоверности расчета аэродинамических характеристик сложных объектов с использованием ANSYS [Электронный ресурс] // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2015. № 1. URL: <http://ce.if-mstuca.ru> (15.02.2018).

16. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. La Canada, California: DCW Industries Ins., 1998. 477 p.

17. Тарасов А.Л. Исследование аэродинамических характеристик профиля крыла вблизи поверхности земли с помощью программного комплекса ANSYS FLUENT // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 216. С. 135–140.

18. Радченко П.И. Круговая обдувка профиля НАСА 23012 в аэродинамической трубе Т-103Н ЦАГИ // Технические отчеты Центрального аэрогидродинамического института им. проф. Н.Е. Жуковского. 1959. Вып. 161. 24 с.

References

1. ANSYS. Available at: <https://www.ansys.com> (accessed 21 February 2018).

2. OpenFOAM. Available at: <https://www.openfoam.com> (accessed 21 February 2018).

3. Golovnev A.V., Tarasov A.L. Research of aerodynamic characteristics of the model of maneuverable aircraft with mechanized wing leading edge using ANSYS FLUENT software package. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies Bulletin]. 2015, no. 218, pp. 42–49. <https://doi.org/10.26467/2079-0619-2015-218-42-49>. (In Russian).

4. Molochikov V.M., Miheev N.I., Dushina O.A. Simulation of subsonic flows with separation using the FLUENT program package: Software applicability study. *Teplofizika i aerodinamika* [Thermophysics and Aeromechanics]. 2009, vol. 16, no. 3, pp. 387–394. (In Russian).

5. Vozhdaev V.V., Kosushkin K.G., Mirgazov R.M. Calculation of aerodynamic characteristics of the wing with SANR airfoil in conditions of natural laminar-turbulent transition. *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies Bulletin]. 2013, no. 188, pp. 92–98. (In Russian).

6. Kalugin V.T., Golubev A.G., Epihin A.S., Michkin A.A. Applicability of the open source package OPENFOAM for numerical modeling separated flow around an aircraft at subsonic and supersonic speeds. *Nauchnyi vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoi aviatsii (MGTU GA)* [Civil Aviation High Technologies Bulletin]. 2014, no. 199, pp. 23–30. (In Russian).

7. Bobarika I.O., Gusev I.N. Численное моделирование аэродинамики несущих элементов летательных аппаратов потоком несжимаемой жидкости при малых числах Маха Numerical simulation of aircraft bearing elements aerodynamics by incompressible fluid flow at small Mach numbers. *Nauchnye trudy (Vestnik MATI)* [Academic papers (MATI Bulletin)]. 2013, no. 21 (93), pp. 59–65. (In Russian).

8. Bratus' S.Yu., Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Gusev I.N., Krivel' S.M. Aerodynamic features and characteristics of GEV configurations of «duck» and «tandem» schemes. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 5, pp. 168–180. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-5-168-180>. (In Russian).

9. Ke J.H., Edwards J. R. Numerical Simulations of Turbulent Flow over Airfoils near and during Static Stall. *Journal of Aircraft*. 2017, vol. 54, no. 5, pp. 1960–1978.

10. Hisham Shehata, Mohamed Zakaria, Ahmed Hussein, Muhammad R. Hajj. Aerodynamic Analysis of Flapped Airfoil at High Angles of Attack. 2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting, AIAA SciTech Forum. <https://doi.org/10.2514/6.2018-0037>

11. Dhamankar N.S., Blaisdell G.A., Lyrintzis A.S. Overview of Turbulent Inflow Boundary Conditions for Large-Eddy Simulations. *AIAA Journal*. 2017, vol. 56, no. 35, pp. 1–18. (<https://doi.org/10.2514/1.J055528>).

12. Venttsel' E.S. *Teoriya veroyatnosti* [Probability theory]. Moscow: Nauka Publ., 1969, 576 p. (In Russian).

13. Belocerkovskij S.M., Nisht M.I. *Otryvnoe i bezotryvnoe obtekanie tonkikh kryl'ev ideal'noi zhidkost'yu* [Detached and attached flow of thin wings by ideal liquid].



Moscow: Nauka Publ., 1978, 352 p. (In Russian).

14. Kholyavko V.I., Usik Yu.F. *Aerodinamicheskie kharakteristiki chastei letatel'nykh apparatov vblizi zemli i v ogranichennykh potokakh* [Aerodynamic characteristics of aircraft parts near the ground and in limited flows]. *Vliyaniye formy v plane na aerodinamicheskie kharakteristiki kryla malogo udlineniya v ogranichenom potoke. Otchet po NIR, nomer gosudarstvennoy registratsii 78075544* [Influence of planform contour on aerodynamic characteristics of the low-aspect-ratio wing in a limited flow. Research report, number of state registration 78075544]. Part 2. Har'kov: Khar'kovskii aviatсионnyi institute Publ., 1980, 80 p.

15. Vshivkov Yu.F., Galushko E.A., Krivel' S.M. Comprehensive reliability assessment of aerodynamic characteristics computed with ANSYS for compound ob-

jects. *Crede Experto: transport, obshchestvo, obrazovanie, yazyk*. 2015, no. 1 (03). Available at: <http://ce/if-mstuca.ru> (accessed 15 February 2018).

16. Wilcox D.C. *Turbulence Modeling for CFD*. La Canada, California: DCW Industries Ins., 1998. 477 p.

17. Tarasov A.L. Research of the wing in ground effect of aerodynamics profile with software ANSYS FLUENT // *Nauchnyi vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies Bulletin]. 2015, no. 216, pp. 135–140. (In Russian).

18. Radchenko P.I. Circular airflow of NACA 23012 profile in wind tunnel. *Tekhnicheskie otchety Central'nogo aerogidrodinamicheskogo instituta im. prof. N.E. Zhukovskogo*. [Technical reports of the Central Aerohydrodynamic Institute named after Professor N.E. Zhukovsky]. 1959, issue 161, 24 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 interests

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



ВЛИЯНИЕ ИННОВАЦИОННЫХ ВАГОНОВ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА В ГРУЗОВОМ ДВИЖЕНИИ

© В.А. Михеев¹

Омский государственный университет путей сообщения,
644046, Российская Федерация, г. Омск, пр. Маркса, 35.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Задача повышения резервов пропускной способности железных дорог и эффективного их использования была и остается актуальной. Поскольку по многим направлениям резервы фактически исчерпаны, то для решения поставленной задачи особо важно использовать технические и технологические подходы, которые дают наибольший мультипликативный эффект в росте производительности подвижного состава. Наиболее предпочтительным в этом смысле является путь интенсивного развития с внедрением и активным использованием инновационного подвижного состава в грузовом движении, позволяющий повысить показатели производительности в рамках существующих ограничений железнодорожной инфраструктуры. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Рассмотрено влияние инновационных вагонов на укрупненные показатели высокопроизводительного использования подвижного состава в грузовом движении. Приведены конструкционные преимущества инновационных грузовых вагонов. Сформированы комплексные системы показателей эффективности инновационных вагонов, обеспечивающие совокупный мультипликативный эффект роста производительности грузового подвижного состава. Показаны результаты модельных расчетов изменения показателей производительности подвижного состава от эксплуатации инновационных полувагонов в грузовом движении за один технологический цикл. **ВЫВОДЫ.** Выполненные в работе исследования и полученные результаты моделирования показывают, что эффективность использования подвижного состава в грузовом движении должна рассматриваться с учетом факторов положительного влияния от внедрения инновационных вагонов.

Ключевые слова: инновационный вагон, грузовой подвижной состав, масса состава поезда, среднесуточный пробег локомотива.

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

Формат цитирования. Михеев В.А. Влияние инновационных вагонов на производительность подвижного состава в грузовом движении // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 223–233. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-223-233

INNOVATION CAR INFLUENCE ON ROLLING STOCK PERFORMANCE IN FREIGHT TRAINS

V.A. Mikheev

Omsk State Transport University,
356 Marx pr., Omsk, 644046, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The problem of increasing the railroads capacity reserves and their efficient use is still relevant. As in many aspects the reserves are almost depleted it is especially important to use technical and technological approaches providing the greatest multiplicative effect in the rolling stock productivity increase for solving the set task. In this sense, the most preferable way is the intensive development with the implementation and active use of the innovation rolling stock in freight trains. It allows to raise performance indicators within the existing limitations of the railway infrastructure. **RESULTS.** The article has considered the innovation car influence on the enlarged indicators of high-performance use of the freight train rolling stock. Structural advantages of the innovation freight cars are given. The

¹Михеев Владислав Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Вагоны и вагонное хозяйство», e-mail: micheev_v_a@mail.ru
Vladislav A. Mikheev, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Cars and Rolling Stock Economy, e-mail: micheev_v_a@mail.ru



complex systems of innovation car efficiency indicators providing the aggregate multiplicative effect of the growth of freight rolling stock performance are formed. The results of model calculations of rolling stock performance indicator variations depending on the operation of innovation gondola cars in freight trains for one production cycle are shown. **CONCLUSIONS.** Conducted researches and obtained modeling results show that operation efficiency of freight rolling stock should be considered taking into account the factors of positive influence resulting from the introduction of innovation cars.

Keywords: *innovation car, freight rolling stock, train weight, locomotive average daily run*

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

For citation. Mikheev V.A. Innovation car influence on rolling stock performance in freight trains. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 223–233. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-223-233 (In Russian).

Введение

Возрастающая грузонапряженность как на отдельных направлениях, так и в целом на железнодорожных линиях ОАО «Российские железные дороги» (ОАО «РЖД») приводит к неизбежному истощению резервов их пропускной способности. Имеются два пути решения этой проблемы: первый – ресурсоемкое развитие сети железнодорожных линий; второй – повышение производительности грузового подвижного состава [1]. Каждое направление имеет свои достоинства и недостатки, сильные и слабые стороны, при этом они вполне логично и эффективно могут дополнять друг друга и реализовываться совместно.

Ключевым условием успешного осуществления второго пути является внедрение не просто новой железнодорожной техники, а именно инновационной, обеспечивающей значительный рост эффективности и производительности тягового и нетягового подвижного состава при соблюдении действующих ограничений существующей инфраструктуры [2, 3]. Примером такого высокоэффективного решения, которое позволит в относительно небольшие сроки существенно повысить производительность железных дорог, может считаться применение инновационных грузовых

вагонов [4]. Активное внедрение и широкая эксплуатация инновационных вагонов дает возможность производительного использования локомотивного и вагонного парков в грузовом движении при полной реализации всех потенциальных возможностей, предоставляемых инфраструктурой [5, 6].

Корпоративной системой стандартизации ОАО «РЖД» в стандарте «Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности»² установлен перечень критериев отнесения грузовых вагонов к инновационным, который должен быть подтвержден в процессе эксплуатации. С позиции данного стандарта инновационный вагон представляется носителем совокупности измеримых количественных и качественных показателей в абсолютном или относительном выражении (рис. 1).

С технической стороны инновационный грузовой вагон – это грузовой вагон, который при массовом внедрении с учетом применения технических решений, отвечающих достигнутому уровню техники, позволяет реализовать определенный технико-экономический эффект для всех участников технологического процесса перевозок в сравнении с вагоном-аналогом [5, 6].

²СТО РЖД 10.002-2015. Вагоны грузовые инновационные. Правила оценки экономической эффективности: стандарт ОАО «РЖД»; утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 26.04.2016 г. № 768р. / Russian Railways Standards 10.002-2015. Innovation freight cars. Assessment rules of economic efficiency: standard of the “Russian Railways” JSC; approved by the Order of the “Russian Railways” JSC of 26 April 2016. No. 768p.



Рис. 1. Критерии инновационных грузовых вагонов
Fig. 1. Criteria of innovation freight cars

Решение задачи повышения производительности подвижного состава за счет инновационных вагонов заключается в мультипликативном эффекте от снижения массы тары вагонов, увеличения вместимости кузова и скорости движения состава, расширения диапазона допустимых осевых нагрузок [7]. Кроме того, увеличиваются межремонтные пробеги как вагонов в целом, так и их отдельного технологического оборудования, сокращаются отказы в процессе эксплуатации, совершенствуются способы погрузки-выгрузки с соответствующим расширением номенклатуры перевозимых грузов:

- масса тары снижается благодаря применению новых высокопрочных сталей;
- увеличение вместимости кузова достигается за счет применения оригинальных конструктивных схем с полным использованием габаритных возможностей вагона;
- увеличение допускаемых осевых нагрузок и скоростей обеспечивается использованием инновационных тележек [8];
- эксплуатационная надежность закладывается современным научно-техническим обеспечением процессов создания и производства вагонных конструкций (рис. 2).



Рис. 2. Конструкционные преимущества инновационных вагонов
Fig. 2. Structural advantages of innovation cars



Результаты исследования и их обсуждение

Очевидно, что полная реализация всех потенциальных возможностей повышения производительности грузового подвижного состава посредством эксплуатации инновационных вагонов требует глубокой структурированной оценки влияния ключевых интенсивных факторов от их внедрения с соответствующим методическим сопровождением и моделированием.

Производительность грузового подвижного состава образуется двумя укрупненными показателями – массой состава поезда и пробегом локомотива (рис. 3) [9, 10]. Приведем оценку влияния эксплуатации инновационных вагонов на формирование данных показателей.

Увеличение фактической нормы загрузки инновационных вагонов за счет увеличения объема кузова позволяет повысить коэффициент использования вместимости и, как следствие, обеспечить рост статической нагрузки. Сниженная масса тары и оптимальная удельная грузоподъемность вагона формируют средний состав поезда [5].

Таким образом, увеличение массы состава грузового поезда образуется комплексной системой показателей эффективности инновационных вагонов:

$$\left\{ \begin{array}{l} k_{\rightarrow \min}^n = \frac{V_{n \text{ const}}}{V_{n \rightarrow \max}^n}; \\ k_{\rightarrow \max}^m = \frac{T_{\text{const}}}{T_{\rightarrow \min}^n}; \\ p_o = \frac{P^n + T^n}{n} \leq p_o^{\text{don}}; \\ q = \frac{P^n + T^n}{2L} \leq q^{\text{don}}, \end{array} \right. \quad (1)$$

где $k_{\rightarrow \min}^n$ – коэффициент соотношения использования вместимости инновационного вагона и вагона-аналога; $k_{\rightarrow \max}^m$ – коэффициент соотношения массы тары инноваци-

онного вагона и вагона-аналога; $V_{n \text{ const}}, V_{n \rightarrow \max}^n$ – удельный погрузочный объем вагона-аналога и инновационного вагона соответственно, $\text{м}^3/\text{т}$; $T_{\text{const}}, T_{\rightarrow \min}^n$ – масса тары вагона-аналога и инновационного вагона соответственно, т; p_o, p_o^{don} – осевая нагрузка инновационного вагона и допустимая осевая нагрузка соответственно, тс/ось; P^n – грузоподъемность инновационного вагона, т; n – число осей; q, q^{don} – погонная нагрузка брутто инновационного вагона и допустимая погонная нагрузка соответственно, тс/м; $2L$ – длина вагона по осям сцепления, м.

Комплекс показателей, приведенный в выражении (1), направлен на обеспечение высокопроизводительной перевозки различных родов грузов в заданных объемах без высокочрезмерной и низкорентабельной модернизации существующей сети. Оптимизируемыми параметрами при этом выступают средний состав поезда и средняя статическая нагрузка, что обуславливается увеличением использования инновационного грузового вагона по мощности и грузоподъемности. С учетом роста осевых и погонных нагрузок, в пределах допустимых инфраструктурой значений, это может дать суммарный эффект в увеличении провозной способности от 6,5% и выше [11, 12].

В результате получаем, что при заданной длине состава, например, до 1000 м, из инновационных вагонов можно набрать поезд большего веса, чем из вагонов-аналогов (табл. 1) [7, 13]. При этом следует отметить, что инновационные вагоны имеют коэффициенты динамики до 1,5 раз меньше, чем у вагонов-аналогов. В этом случае возможно одновременно увеличить провозную способность, а следовательно, производительность локомотивов, и сохранить верхнее строение пути.



Рис. 3. Показатели производительности грузового подвижного состава

Fig. 3. Indicators of freight rolling stock performance

Таблица 1

Характеристика поездов, сформированных из инновационных вагонов
и вагонов-аналогов

Table 1

Characteristic of trains formed of innovation cars
and analog cars

Тип вагона	Вес тары, т	Грузо- подъем- ность, т	Погонная нагрузка, т/м	Длина сцепления по осям, мм	Кол-во вагонов в составе	Вес груза в одном составе, тс	Вес поезда, тс	
							нетто	брутто
Вагон-аналог (4-осный, полувагон, усредненный, производство УВЗ)	24,3	71	6,84	13920	71	5041	1725	6766
Инновационный вагон (4-осный, полувагон, усредненный, производство УВЗ)	23	75	7,04 (при допуске не более 8,2)*	13920	71	5325	1633	6958

*Установлено по условию допустимого нагружения всех основных объектов инфраструктуры.

Целевое изменение веса поезда с
инновационными вагонами определится по
формуле:

$$\Delta Q_{\rightarrow \max}^{\delta} = \gamma_{\rightarrow 1}^h n_{const}^h q_{\rightarrow \max}^n \frac{1}{k_{\rightarrow \min}^n} +$$

$$+ \gamma_{\rightarrow 1}^h n_{const}^h q_{\rightarrow \min}^m \frac{1}{k_{\rightarrow \max}^m}, \quad (2)$$

при этом

$$k_{\rightarrow \min}^Q = \frac{Q_{\rightarrow \min}^m}{Q_{\rightarrow \max}^{\delta}}, \quad (3)$$

где $\gamma_{\rightarrow 1}^h$ – доля инновационных вагонов в
структуре состава поезда; n_{const}^h – состав



поезда, вагоны; $q_{\rightarrow \max}^n$ – полезная масса груза в составе, тс; $q_{\rightarrow \min}^m$ – масса тары в составе, тс; $k_{\rightarrow \min}^Q$ – коэффициент соотношения веса нетто поезда к весу брутто; $Q_{\rightarrow \min}^m$, $Q_{\rightarrow \max}^b$ – вес поезда нетто и брутто соответственно, тс.

Ключевым фактором, оказывающим влияние на среднесуточный пробег локомотива, является участковая скорость движения³.

На сегодняшний день средняя участковая скорость составляет 37,1 км/ч, в то время как техническая скорость – 46,3 км/ч [11]. Большая часть технических возможностей роста участковой скорости теряется из-за простоев и задержек поездов на станциях и перегонах, а также потерь времени от низкопроизводительных погрузочно-разгрузочных работ. Процентное разложение общего эксплуатационного времени работы грузового вагона представлено на рис. 4 [11].

Общие вагоно-часы производственного цикла инновационного вагона определяются по элементам рабочего времени:

$$\Sigma nt_{\rightarrow \min}^o = \Sigma nt_{\rightarrow \min}^{\partial \partial} + \Sigma nt_{\rightarrow \min}^{mex} + \Sigma nt_{\rightarrow \min}^{cp}, \quad (4)$$

где $\Sigma nt_{\rightarrow \min}^{\partial \partial}$ – вагоно-часы в движении; $\Sigma nt_{\rightarrow \min}^{mex}$ – вагоно-часы нахождения на станциях и перегонах; $\Sigma nt_{\rightarrow \min}^{cp}$ – вагоно-часы простоя под грузовыми операциями.

Сокращение производственного цикла инновационных вагонов в выражении (2) достигается за счет сокращения эксплуатационных отказов и связанных с ними задержек и простоев на станциях и перегонах, а также ускорением выполнения погрузочно-разгрузочных работ.

Сравнительная характеристика эксплуатационной надежности инновационного вагона и вагона-аналога по ряду ключевых параметров приведена в табл. 2 [13, 14].

В дополнение к данным, указанным в табл. 2, на рис. 5 представлено сравнение значений средних вероятностей безотказной работы инновационного грузового вагона и вагона-аналога [5].

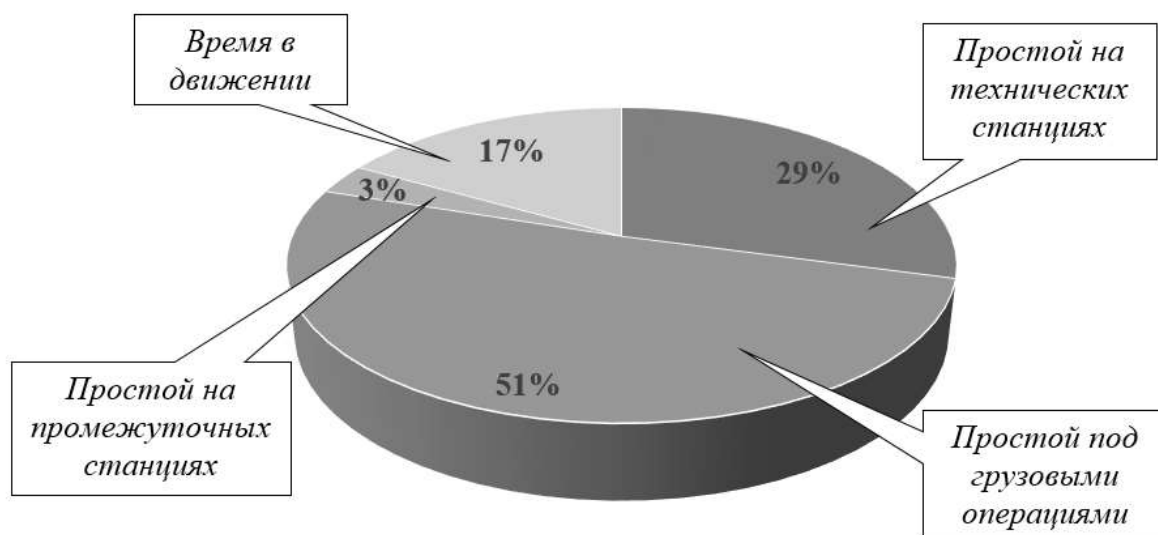


Рис. 4. Время работы грузового вагона
Fig. 4. Freight car operation time

³Виноградов Ю.Н. Эксплуатация электровозов: конспект лекций. Екатеринбург: РИО УрГУПС, 2007. 109 с. / Vinogradov Yu.N. Operation of electric locomotives: abstracts of lectures. Ekaterinburg: Ural State University of Railway Transport RIO Publ., 2007, 109 p.



Таблица 2

Параметры эксплуатационной надежности инновационного вагона и вагона-аналога
Table 2

Operational reliability parameters of an innovation car and an analog car

Наименование параметра	Вагон-аналог (полувагон)	Инновационный вагон (полувагон)
Нормативный срок службы, лет	22	32
Средняя частота отцепок	1,44	0,39
Количество ТОР на 1 млн км	24,9	8,3
Пробег от постройки и капитального ремонта до деповского ремонта, не менее лет/тыс. км	3/210	6/500
Межремонтный пробег между деповскими ремонтами, не менее лет/тыс. км	2/160	4/250
Стоимость жизненного цикла, тыс. руб.	1363	450

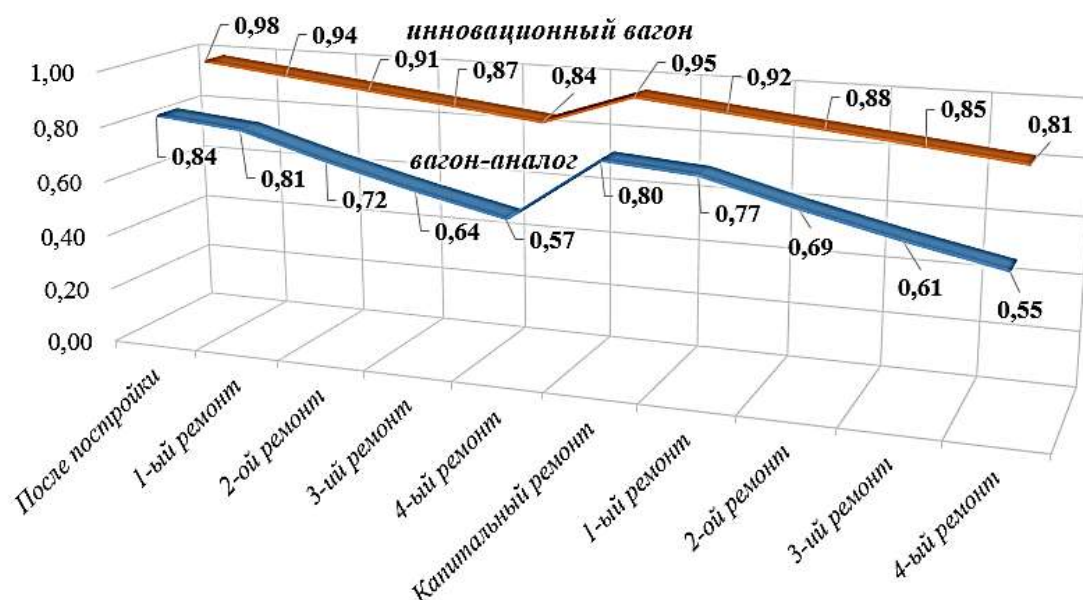


Рис. 5. Вероятности безотказной работы инновационного вагона и вагона-аналога
Fig. 5. Probability of no-failure operation of an innovation car and an analog car

Исходя из приведенных данных, можно заключить, что вероятность эксплуатационного отказа или попадания инновационного вагона в ремонт значительно снижается, соответственно снижаются вагоно-часы простоев и задержек на перегонах. Более того, рост надежности влечет обоснованное увеличение гарантийного пробега и, как следствие, сокращение простоя на технических станциях [15].

Ведущими научно-исследовательскими организациями, занимающимися разработками инновационных вагонных конструкций, выполнен значительный объем технических работ, направленных на

ускорение выполнения операций погрузки и выгрузки [8, 16, 17]. Такие конструктивные решения, как подпружиненные запоры механизмов усиленных крышек люков, усиленные торцевые стены и верхняя обвязка боковых стен, гладкая обшивка повышенной прочности, промежуточные стойки переменной высоты сечения и продольные сплошные гофры увеличивают ресурс кузова и обеспечивают лучшую и ускоренную погрузку-выгрузку различных родов грузов. Совокупный эффект в снижении вагоно-часов простоя может достигать от 2,9% и выше [11, 18].

В результате увеличение участковой



скорости образуется следующей комплексной системой показателей эффективности от использования инновационных вагонов:

$$\begin{cases} k_{\rightarrow \max}^{\Delta V_y} = k_{\rightarrow 1}^{V_y} \frac{V_m}{V_{\text{дон}}} \left(1 - \frac{V_{\text{дон}}}{V_{\text{дон}}^n} \right); \\ k_{\rightarrow 1}^{V_y} = \frac{V_{y \rightarrow \max}^n}{V_m}; \\ t_{\text{сп}}^n \leq t_{\text{сп}}; \\ p(t)^n \rightarrow 0,98, \end{cases} \quad (5)$$

где $k_{\rightarrow \max}^{\Delta V_y}$ – коэффициент изменения участковой скорости; $k_{\rightarrow 1}^{V_y}$ – коэффициент участковой скорости; $V_{y \rightarrow \max}^n$, V_m – участковая и техническая скорость движения соответственно, км/ч; $V_{\text{дон}}$, $V_{\text{дон}}^n$ – допускаемая скорость движения грузового поезда с вагонами-аналогами и инновационными вагонами соответственно, км/ч; $t_{\text{сп}}$, $t_{\text{сп}}^n$ – норма простоя вагонов под грузовыми операциями и простоя инновационного вагона под грузовыми операциями соответственно, ч; $p(t)^n$ – эксплуатационная вероятность безотказной работы инновационного грузового вагона.

Относительная долевая зависимость увеличения среднесуточного пробега локомотива при росте участковой скорости приведена на рис. 6 [10].

Целевое изменение среднесуточного пробега локомотива определится по формуле

$$\Delta S_{\rightarrow \max}^n = \frac{24}{\frac{1}{V_{\rightarrow \max}^y} + \frac{t_{\text{const}}^n}{L_y}} \quad (6)$$

где $V_{\rightarrow \max}^y$ – участковая скорость, км/ч; t_{const}^n – нормативные простои локомотива, ч; L_y – протяженность участка, км.

С учетом выражений (2) и (6) определяется целевое изменение среднесуточной производительности подвижного состава:

$$\Delta W_{\rightarrow \max}^n = \frac{W^n}{Q^{\delta}} \Delta Q_{\rightarrow \max}^{\delta} + \frac{W^n}{S^n} \Delta S_{\rightarrow \max}^n. \quad (7)$$

Слагаемые, входящие в выражение (7), отражают влияние двух результирующих эксплуатационных показателей на среднесуточную производительность подвижного состава в грузовом движении. Первое слагаемое показывает эксплуатационный эффект от повышения веса поезда брутто, второе – от повышения среднесуточного пробега локомотива [21].

Модельные расчеты мультипликативного эффекта от эксплуатации инновационных полувагонов в грузовом движении за один технологический цикл представлены на рис. 7.

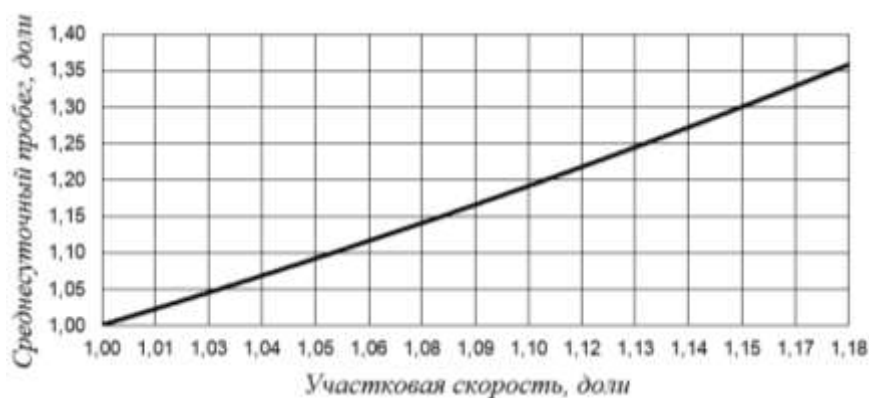


Рис. 6. Зависимость среднесуточного пробега от участковой скорости
Fig. 6. Average daily run dependence on the service speed

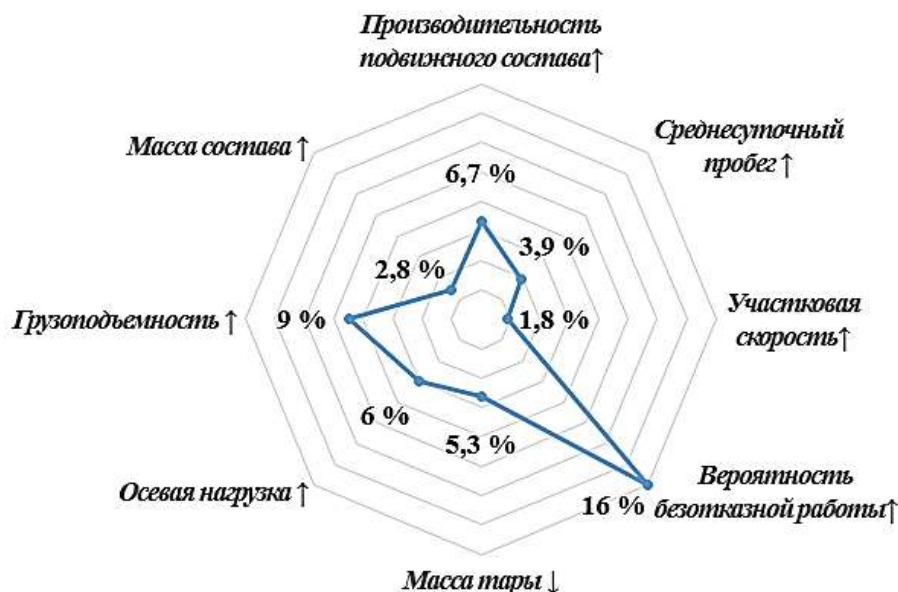


Рис. 7. Изменение показателей производительности подвижного состава
Fig. 7. Variation of rolling stock performance indicators

Заключение

Таким образом, эксплуатация инновационных грузовых вагонов оказывает интенсивное влияние на формирование показателей производительной работы подвижного состава в грузовом движении в условиях существующей инфраструктуры. Фиксируемый модельными расчетами положительный эффект обеспечивается совокупным ростом массы состава поезда и увеличением среднесуточного пробега при совместном действии комплексных систем показателей эффективности инновационных вагонов, приведенных в выражениях (1) и (5). Итогом служит высокопроизводительное использование вагонного и локомотивного парков с сопутствующим ростом резервов провозной и пропускной способности сети железнодорожных линий ОАО «РЖД».

Выводы:

- 1) внедрение инновационных вагонов повышает эксплуатационную эффективность использования подвижного состава в грузовом движении независимо от вида тяги на основе интенсивных факторов и позволяет полностью реализовывать имеющиеся возможности роста производительности в условиях существующей инфраструктуры;
- 2) рассмотренный структурированный подход к оценке изменения показателей производительности при внедрении инновационных вагонов позволяет определить влияние на это изменение каждой конкретной модели инновационного вагона и выполнить сравнение между ними по единой методике и по одинаковым показателям перевозочной работы.

Библиографический список

1. Липидус Б.М. Стратегические тренды развития железнодорожного транспорта // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2015. № 6. С. 2–9.
2. Коссов В.С. Инновационное развитие подвижного состава в рамках реализации Стратегии холдинга «РЖД» // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2014. № 5. С. 53–60.
3. Гапанович В.А. Инновационная деятельность Российских железных дорог // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2014. № 5. С. 4–16.
4. Липидус Б.М. Повышение производительности и эффективности железнодорожного транспорта на инновационной основе // Вестник ВНИИЖТ. 2012. № 5. С. 3–6.



5. Соколов А.М. Научные основы создания и оценки эффективности внедрения инновационных вагонов // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2015. № 2. С. 1–13.
6. Лapidус Б.М., Соколов А.М. Отраслевая технологическая платформа «высокопроизводительный грузовой подвижной состав» – путь к использованию резервов провозной способности железных дорог // Вестник ВНИИЖТ. 2011. № 4. С. 3–8.
7. Филиппов В.Н., Смольянинов А.В., Козлов И.В., Подлесников Я.Д. Параметры инновационных вагонов и некоторые проблемы их реализации // Транспорт Урала. 2017. № 1 (52). С. 25–31.
8. Корникова Т.И., Афанасьев А.Е. Конкуренция подстегивает производителей: продолжается разработка полувагонов нового поколения с улучшенными технико-экономическими параметрами // Вагоны и вагонное хозяйство. 2009. № 1 (17). С. 6–9.
9. Исаков М.П. Анализ эксплуатационных показателей полигонов // Мир транспорта. 2014. № 5. С. 162–166.
10. Валеев Н.А. Критерии эффективности использования локомотивного парка // Бюллетень Объединенного ученого совета ОАО «РЖД». 2015. № 2. С. 37–43.
11. Грузовой железнодорожный транспорт России в 2010–2015 гг.: аналитический доклад [Электронный ресурс] // Институт проблем естественных монополий. 2016. URL: http://www.ipem.ru/files/files/research/2016_05_25_analiticheskiy_doklad_po_zhd_transportu_2010_2015.pdf (12.04.2018).
12. Лакин И.К. Анализ основных показателей работы железнодорожного транспорта // Наука и транспорт. 2007. № 1. С. 60–63.
13. ОВК – лидер нового поколения: годовой отчет и

- финансовая отчетность за 2015 год [Электронный ресурс] // Объединенная вагонная компания. Годовые отчеты. 2016. URL: <https://www.uniwagon.com/media/documents/OVK-AR-2015-2016-08-17-RUS.PDF> (12.04.2018).
14. Для инновационных вагонов УВЗ увеличены межремонтные пробеги [Электронный ресурс] // Европейская подшипниковая корпорация. Информационный обзор. 1 апреля 2016. URL: https://epkggroup.ru/common/upload/2016/_2016.04.01.pdf (12.04.2018).
15. Хусаинов Ф. О влиянии операторов подвижного состава на некоторые показатели эксплуатационной работы железных дорог // Вектор транспорта: альманах. 2015. № 3. С. 22–29.
16. Смольянинов А.В., Филиппов В.Н., Козлов И.В., Давыдов А.Н. Параметры и конструктивное исполнение высокопроизводительного подвижного состава // Транспорт Урала. 2013. № 1 (36). С. 46–49.
17. Бороненко Ю.П. Инновационный грузовой подвижной состав железных дорог и его высокотехнологичное производство // Наука и транспорт. 2012. № 3. С. 18–20.
18. Курбасов А.С. Социальная значимость железных дорог России: потребности и возможности // Транспорт Российской Федерации. 2009. № 3-4 (22-23). С. 58–60.
19. Зарипов Р.Ю. Способы повышения эффективности использования грузовых вагонов на железнодорожном транспорте // Инновационные технологии на транспорте: образование, наука, практика: сборник трудов XLI Междунар. науч.-практ. конф. КазАТК (Алматы, Казахстан, 3–4 апреля 2017 г.). Алматы: Изд-во Казахской академии транспорта и коммуникаций им. М. Тынышпаева, 2017. Т. 1. С. 324–329.

References

1. Lapidus B.M. Strategic trends of railway transport development. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD"* [Bulletin of the Joint Academic Council of "Russian Railways" JSC]. 2015, no. 6, pp. 2–9. (In Russian).
2. Kossov V.S. Innovative development of rolling stock within the implementation of the strategy of "Russian Railways" holding. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD"* [Bulletin of the Joint Academic Council of "Russian Railways" JSC]. 2014, no. 5, pp. 53–60. (In Russian).
3. Gapanovich V.A. Innovative activity of Russian Railways. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD"* [Bulletin of the Joint Academic Council of "Russian Railways" JSC]. 2014, no. 5, pp. 4–16. (In Russian).
4. Lapidus B.M. Improving railway transport performance and efficiency based on innovation. *Vestnik VNIIZhT* [VNIIZhT Bulletin]. 2012, no. 5, pp. 3–6. (In Russian).
5. Sokolov A.M. Scientific bases for the creation and

- evaluation of innovation car introduction efficiency. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD"* [Bulletin of the Joint Academic Council of "Russian Railways" JSC]. 2015, no. 2, pp. 1–13. (In Russian).
6. Lapidus B.M., Sokolov A.M. Industrial technological platform "high-performance freight rolling stock" – a way to use railroad carrying capacity reserves. *Vestnik VNIIZhT* [VNIIZhT Bulletin]. 2011, no. 4, pp. 3–8. (In Russian).
7. Filippov V.N., Smol'yaninov A.V., Kozlov I.V., Podlesnikov Ya.D. The options of innovation railway cars and some problems of their realization. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2017, no. 1 (52), pp. 25–31. (In Russian).
8. Kornikova T.I., Afanas'ev A.E. Competition urges producers on: development of new generation of gondola cars with the improved technical and economic parameters. *Vagony i vagonnoe khozyaistvo* [Cars and Rolling Stock]. 2009, no. 1 (17), pp. 6–9. (In Russian).
9. Isakov M.P. Analysis of the polygons operating char-



- acteristics. *Mir transporta* [World of Transport]. 2014, no. 5, pp.162–166. (In Russian).
10. Valeev N.A. Locomotive park efficiency use criteria. *Byulleten' Ob"edinennogo uchenogo soveta OAO "RZhD"* [Bulletin of the Joint Academic Council of "Russian Railways" JSC]. 2015, no. 2, pp. 37–43. (In Russian).
11. *Gruzovoi zheleznodorozhnyi transport Rossii v 2010–2015 gg.: analiticheskii doklad* [Freight railway transport of Russia in 2010–2015]. *Institut problem estestvennykh monopolii, 2016* [Institute of Natural Monopolies Research]. Available at: http://www.ipem.ru/files/files/research/2016_05_25_analiticheskii_doklad_po_zhd_transportu_2010_2015.pdf (accessed 12 April 2018).
12. Lakin I.K. Analysis of key railway transport operation indicators. *Nauka i transport* [Science and Transport]. 2007, no. 1, pp. 60–63. (In Russian).
13. OVK – *lider novogo pokoleniya: godovoi otchet i finansovaya otchetnost' za 2015 god* [United railroad car company – the leader of new generation: the annual report and financial statements for 2015]. *Ob"edinennaya vagonnaya kompaniya. Godovye otchety. 2016* [United railroad car company. Annual reports 2016]. Available at: <https://www.uniwagon.com/media/documents/OVK-AR-2015-2016-08-17-RUS.PDF> (accessed 12 April 2018).
14. *Dlya innovatsionnykh vagonov UVZ uvelicheny mezhremontnye probegi* [Between-repair runs are increased for UVZ innovation cars]. *Evropeiskaya podshipnikovaya korporatsiya. Informatsionnyi obzor. 1 aprelya 2016* [European Bearing Corporation. Information review. 1 April 2016]. Available at: https://epkggroup.ru/common/upload/2016/_2016.04.01.pdf (accessed 12 April 2018).
15. Husainov F. On the influence of rolling stock operators on some railroad performance indicators. *Vektor transporta: al'manah*. [Vector of Transport: almanac]. 2015, no. 3, pp. 22–29. (In Russian).
16. Smol'yaninov A.V., Filippov V.N., Kozlov I.V., Davydov A.N. Parameters and design of high-performance rolling stock. *Transport Urala* [Transport of the Urals]. 2013, no. 1 (36), pp. 46–49. (In Russian).
17. Boronenko Yu.P. Railroad innovation freight rolling stock and its high technology manufacturing. *Nauka i transport* [Science and Transport]. 2012, no. 3, pp. 18–20. (In Russian).
18. Kurbasov A.S. Social importance of railroads in Russia: requirements and opportunities. *Transport Rossijskoj Federacii*. [Transport of the Russian Federation]. 2009, no. 3-4 (22-23), pp. 58–60. (In Russian).
19. Zaripov R.Yu. *Sposoby povysheniya effektivnosti ispol'zovaniya gruzovykh vagonov na zheleznodorozhnom transporte* [Methods to increase the application efficiency of freight cars on railway transport]. *Sbornik trudov XLI Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii KazATK "Innovatsionnye tekhnologii na transporte: obrazovanie, nauka, praktika"* [Proceedings of XLI KazATK International scientific and practical conference "Innovation technologies on transport: education, science, practice"]. Almaty: Tynyshpaev Kazakh Academy of Transport and Communication Publ., 2017, vol. 1, pp. 324–329. (In Kazakh).

Критерии авторства

Михеев В.А. провел исследование, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Михеев В.А. заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Mikheev V.A. has conducted the study, prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Conflict of interest

Mikheev V.A. declares that there is no conflict of interests regarding the publication of this article.



КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АМОРТИЗАТОРОВ АВТОТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА ПРИ ПЕРЕЕЗДЕ ЕДИНИЧНОЙ НЕРОВНОСТИ

© А.И. Федотов¹, Д.А. Тихов-Тинников², А.В. Лысенко³, Н.Ю. Кузнецов⁴

^{1,3,4}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

²Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления,
670013, Российская Федерация, Республика Бурятия, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в, стр. 1.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В статье приведены результаты экспериментальных исследований изменения углов поворота, крена и дифферента автомобиля при его движении по окружности с переездом через единичную неровность при изменении характеристик амортизаторов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Результаты экспериментальных исследований представлены в виде графиков зависимостей угла поворота, крена и дифферента автомобиля при его движении по окружности и переезде единичной неровности при изменении технического состояния амортизаторов. Получены рабочие диаграммы и характеристики амортизаторов на динамическом стенде контроля рабочих параметров элементов демпфирования подвески. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты экспериментального исследования процесса переезда автомобилем единичной неровности, проведенного в одинаковых условиях, позволяют выявить зависимость изменения углов поворота, крена и дифферента автомобиля при изменении технического состояния амортизаторов. Параметры процесса движения автомобиля при действии центробежной силы и переезде через единичную неровность, характеризующие устойчивость автомобиля, могут быть использованы в качестве диагностических для высокоинформативного метода контроля технического состояния его амортизаторов в условиях эксплуатации.

Ключевые слова: амортизатор, подвеска, угол поворота, крен, дифферент, единичная неровность, устойчивость, дорожный метод, режим тестового воздействия.

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

Формат цитирования. Федотов А.И., Тихов-Тинников Д.А., Лысенко А.В., Кузнецов Н.Ю. Контроль технического состояния амортизаторов автотранспортного средства при переезде единичной неровности // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7. С. 234–240. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-234-240

CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF VEHICLE SHOCK ABSORBERS WHEN CROSSING A SINGLE HUMP

A.I. Fedotov, D.A. Tikhov-Tinnikov, A.V. Lysenko, N.Yu. Kuznetsov

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

¹Федотов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, e-mail: fai@istu.edu

Alexander I. Fedotov, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Motor Transport, e-mail: fai.abs@yandex.ru

²Тихов-Тинников Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобили», e-mail: dm_tt@mail.ru

Dmitry A. Tikhov-Tinnikov, Candidate of technical sciences, Associate Professor, Head of the Automobile Department, e-mail: dm_tt@mail.ru

³Лысенко Андрей Владимирович, аспирант, e-mail: stobravo@gmail.com

Andrey V. Lysenko, Postgraduate student, e-mail: stobravo@gmail.com

⁴Кузнецов Николай Юрьевич, аспирант e-mail: Kuznetsovk92@mail.ru

Nikolay Yu. Kuznetsov, Postgraduate student, e-mail: Kuznetsovk92@mail.ru



East-Siberian State University of Technology and Management,
40b, Klyuchevskaya St., bld 1, Ulan-Ude, Republic of Buryatiya, 670013, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The article presents the results of experimental studies of variations in the steering, banking and trim angles of the vehicle when it moves in a circle crossing a single hump and the characteristics of shock absorbers are changed. **RESULTS.** The results of experimental studies are presented in the form of dependency graphs of the angle of vehicle steering, banking and trim when the vehicle moves in the circle and crosses a single hump and the technical condition of shock absorbers is changed. Operating diagrams and characteristics of shock absorbers are obtained using a dynamic test bench controlling operating parameters of suspension damping elements. **CONCLUSION.** The results of experimental studies of the process of vehicle crossing a single hump conducted in the same conditions allow to identify the dependence of the variation in the angles of vehicle steering, banking and trim with the change in the technical condition of shock absorbers. The parameters of the process of vehicle movement under the action of the centrifugal force and crossing a single hump characterizing vehicle stability can be used as diagnostic ones for a highly informative monitoring method of the technical condition of vehicle shock absorbers under operation.

Keywords: shock absorber, suspension, angle of steering, banking, trim, single hump, resistance, road method, test action mode

Information about the article. Received March 13, 2018; accepted for publication June 13, 2018; available online June 22, 2018.

For citation. Fedotov A.I., Tikhov-Tinnikov D.A., Lysenko A.V., Kuznetsov N.Yu. Control of technical condition of vehicle shock absorbers when crossing a single hump. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 7, pp. 234–240. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-234-240 (In Russian).

Введение

Автомобиль представляет собой сложную колебательную систему, состоящую из поддрессоренных и недрессоренных масс. К поддрессоренным элементам относятся кузов и рама с укрепленными на них агрегатами и устройствами, а к недрессоренным – мосты и оси с колесами, детали подвески. Поддрессоренные массы автомобиля соединены с недрессоренными при помощи упругих, демпфирующих и направляющих элементов [1].

При движении автомобиля кузов и колеса совершают вынужденные вертикальные и угловые колебания. Функцию гашения колебаний кузова и колесных узлов автомобиля выполняют гидравлические телескопические амортизаторы [2].

Амортизаторы работают в тяжелых условиях и со временем теряют способность обеспечивать стабильный контакт шины с дорожным покрытием, от которого зависят устойчивость и управляемость автомобиля. У автомобиля с неисправными амортизаторами на 25–30% удлиняется тормозной путь, на 13% увеличивается

время торможения, снижается скорость безопасного прохождения поворотов [3].

В условиях эксплуатации контроль технического состояния амортизаторов и деталей подвески проводят на специализированных вибростендах, которые позволяют оценивать способность амортизаторов обеспечивать стабильный контакт шин с площадками стенда в условиях вибрации колесного узла [4]. Анализируя стендовые методы технического контроля подвески, можно сделать вывод, что они не оценивают качество сцепления шин автомобиля в боковом направлении [5].

Одним из способов решения данной проблемы является разработка дорожного метода контроля технического состояния амортизаторов в условиях эксплуатации, учитывающего стабильность пятна контакта и величины бокового сцепления шин с дорогой. При этом контролируемыми параметрами являются величина изменения угла поворота, крена и дифферента автомобиля при его движении по окружности с переездом через единичную неровность [6].



Описание методик проведения экспериментов.

Экспериментальное исследование процесса переезда автомобилем единичной неровности выполняли посредством заездов автомобиля Ford Focus, имеющего снаряженную массу, по траектории в виде окружности радиусом 15 м со скоростью 40 км/ч. В процессе исследования измеряли следующие параметры:

- угол крена автомобиля;
- угол дифферента автомобиля;
- угол поворота подрессоренной

массы автомобиля относительно вертикальной оси.

Для проведения экспериментального исследования была подготовлена площадка горизонтальной дороги без уклонов с твердым асфальтобетонным покрытием (схема площадки показана на рис. 1).

Система измерения углов поворота, крена и дифферента автомобиля выполнена на базе авиационных гироскопических приборов ЦГВ-4К и Г-3М [7], собранных в единый измерительный комплекс и смонтированных в салоне автомобиля Ford Focus (рис. 2) [8].

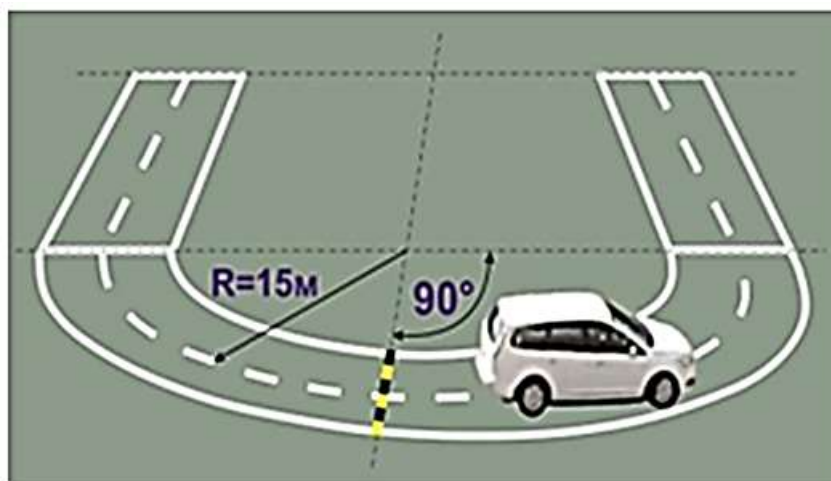


Рис. 1. Площадка для экспериментальных исследований технического состояния подвески автомобиля

Fig. 1. Platform for experimental studies of vehicle suspension technical condition



Рис. 2. Размещение измерительного комплекса с гироскопами в автомобиле

Fig. 2. Location of the measuring complex with gyroscopes in the vehicle



Экспериментальное исследование процесса переезда автомобилем единичной неровности проводилось при варьировании технического состояния амортизаторов:

- с амортизаторами, имеющими характеристику, соответствующую параметрам завода-изготовителя;
- с амортизаторами, имеющими силу сопротивления на ходе сжатия и отбоя

при скорости перемещения поршня от $V_0 = 0,0$ м/с до $V_{max} = 0,5$ м/с менее 100 Н.

Установка амортизаторов производилась по двум вариантам:

- все амортизаторы исправны;
- передние амортизаторы исправны, задние амортизаторы неисправны.

Работоспособность амортизаторов определяли по рабочим диаграммам и характеристикам.

Результаты исследований

В результате дорожного эксперимента были получены графики углов поворота $\gamma = f(t)$, крена $\beta = f(t)$, дифферента $\alpha = f(t)$ подрессоренной массы автомоби-

ля при его движении со скоростью $V = 40$ км/ч по окружности $R = 15$ м и переезде через неровность прямоугольного профиля 50×50 мм (рис. 3).

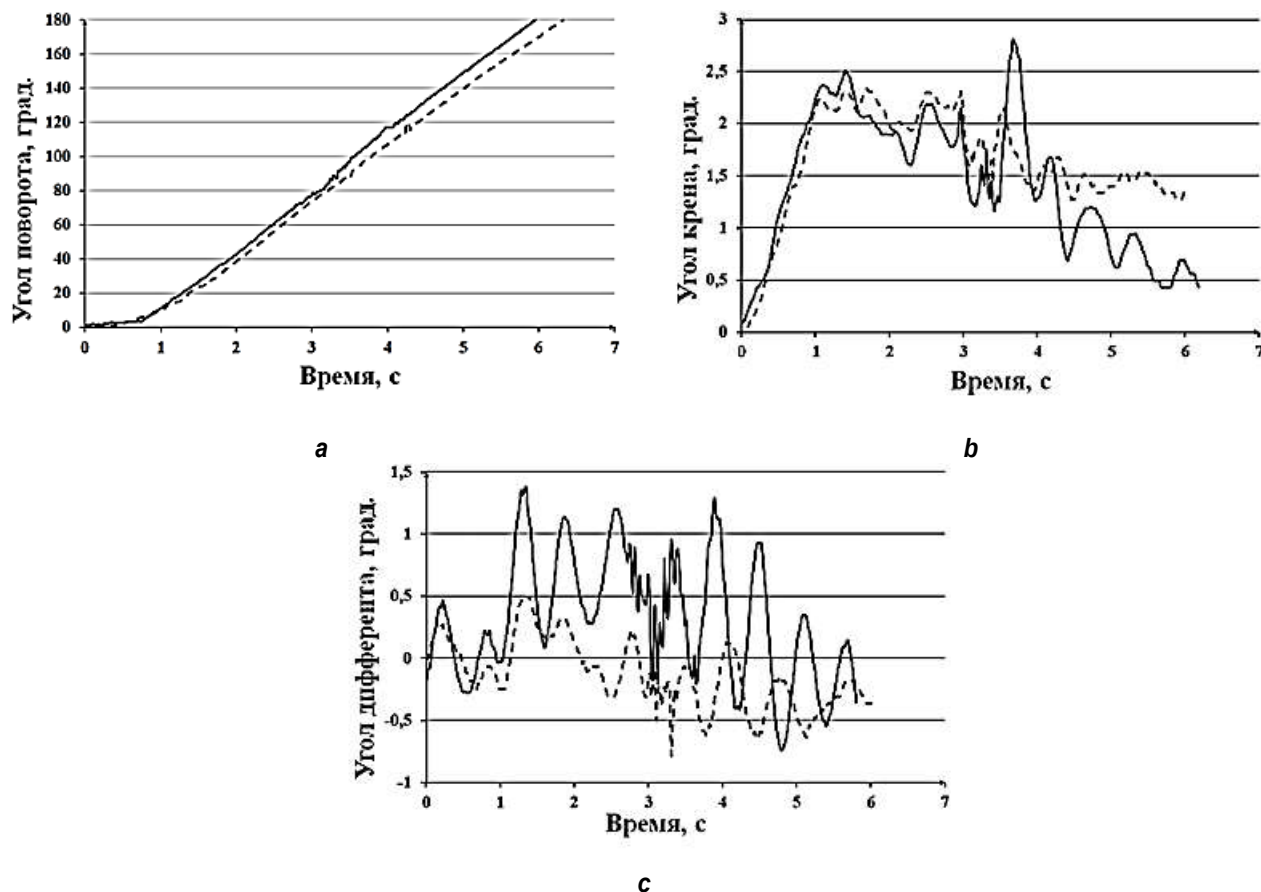


Рис. 3. Графики углов поворота (а), крена (b) и дифферента (с) подрессоренной массы автомобиля при изменении технического состояния амортизаторов

--- все амортизаторы исправные
— задние амортизаторы неисправные

Fig. 2. Graphs of steering (a), banking (b) and trim (c) angles of vehicle sprung mass when changing the technical condition of shock absorbers

--- all shock absorbers are serviceable
— rear shock absorbers are faulty



При исследовании траектории движения и угловых колебаний поддрессоренной массы автомобиля с исправными амортизаторами выявлено, что отклонение от заданной траектории отсутствует; при переезде единичной неровности происходит изменение угла крена на величину $\Delta\beta = 0,8$ град., угла дифферента – на величину $\Delta\alpha = 1,0$ град.

Анализ результатов дорожных экспериментов, проведенных на автомобиле с установленными неисправными задними амортизаторами, позволяет сделать следующие выводы:

- при наезде колес задней оси автомобиля на единичную неровность происходит потеря шинами сцепления с дорожным покрытием вследствие малого усилия сопротивления амортизаторов на ходе сжатия;
- отсутствие боковых реакций на шинах задней оси приводит к ее сносу под действием центробежной силы;
- при сносе задней оси происходит изменение радиуса поворота автомобиля;
- при переезде единичной неровности происходит изменение угла крена на величину $\Delta\beta = 1,6$ град., угла дифферента –

на величину $\Delta\alpha = 1,5$ град.

Для получения рабочих диаграмм и характеристик амортизаторов была использована общепринятая методика получения зависимости силы сопротивления поршня в рабочем цилиндре от величины и скорости его перемещения (рис 4.) [9, 10].

Измерение силы сопротивления амортизатора при перемещении поршня на ходе сжатия и отбоя проводилось на динамическом стенде контроля рабочих параметров элементов демпфирования подвески. Шток амортизатора, который установлен на стенде, задавалось возвратно-поступательное движение с разной скоростью. Возникающая при этом сила сопротивления движению поршня амортизатора через шток передавалась на датчик измерения силы, который регистрировал возникающее усилие [11–13].

Полученные рабочие диаграммы и характеристики дают исчерпывающее представление о демпфирующих способностях амортизаторов и в некоторых случаях позволяют выявить причину снижения сопротивления амортизатора на ходе сжатия и ходе отбоя [12].

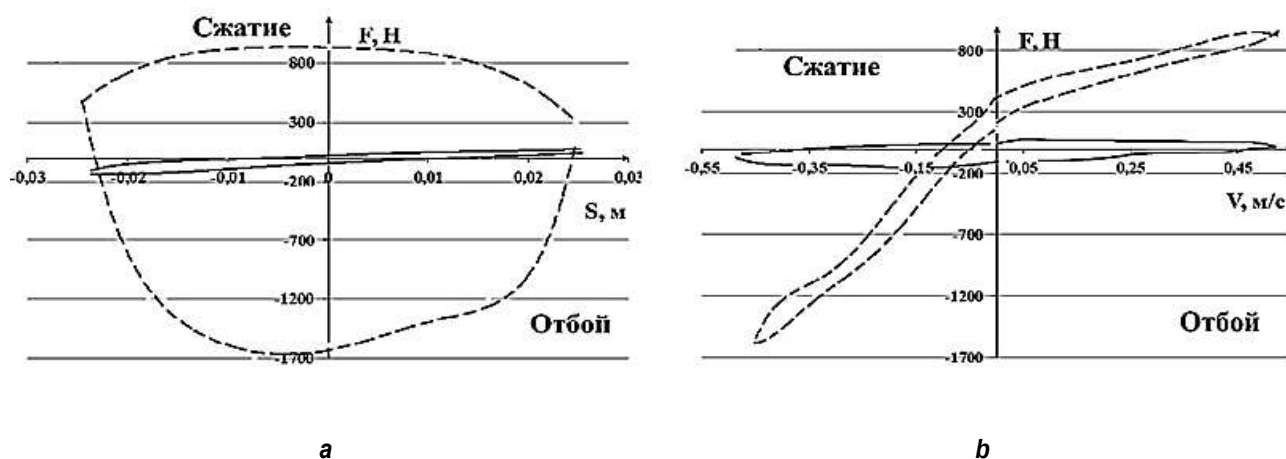


Рис. 4. А – рабочие диаграммы; б – характеристики исправного и неисправного задних амортизаторов автомобиля Ford Focus при изменении их функциональных характеристик:

--- новый исправный амортизатор
— неисправный амортизатор

Fig. 4. A – Operation diagrams; б – characteristics of serviceable and faulty rear shock absorbers of Ford Focus when changing their functional characteristics:

--- new serviceable shock absorber
— faulty shock absorber



Результаты испытаний амортизаторов на динамическом стенде контроля рабочих параметров элементов демпфирования позволяют количественно связать изменения траектории и угловых колебаний

подрессоренной массы автомобиля с потенциальной способностью амортизаторов гасить колебания кузова и колесных узлов автомобиля [14].

Заключение

Разработанная методика позволяет контролировать изменения углов поворота, крена и дифферента подрессоренной массы автомобиля при его движении по окружности с переездом через единичную неровность.

Результаты экспериментального исследования процесса переезда автомобилем единичной неровности позволяют выявить изменение углов поворота, крена и дифферента автомобиля при изменении технического состояния амортизаторов.

Метод получения рабочих диаграмм

и характеристик амортизаторов с использованием динамического стенда позволяет оценивать их техническое состояние по величине усилия сопротивления.

Параметры процесса движения автомобиля при действии центробежной силы и переезде через единичную неровность, характеризующие устойчивость автомобиля, могут быть использованы в качестве диагностических для высокоинформативного метода контроля технического состояния его амортизаторов в условиях эксплуатации.

Библиографический список

1. Раймпель Й. Шасси автомобиля: амортизаторы, шины и колёса / пер. с нем. В.П. Агапова; под ред. О.Д. Златовратского. М.: Машиностроение, 1986. 320 с.
2. Дербаремдигер А.Д. Гидравлические амортизаторы автомобилей. М.: Машиностроение, 1969. 236 с.
3. Рябов И.М., Чернышов К.В., Гасанов М.М., Мухучев Ш.М. О проблеме безопасности при эксплуатации автомобилей с неисправными амортизаторами // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. № 19 (146). С. 103–106.
4. Каньшин В.А., Третьяков А.М. Анализ методов диагностирования амортизаторов на современных вибростендах // Состояние и перспективы развития социально-культурного и технического сервиса: материалы II Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Бийск, 24–25 апреля 2014 г.). В 2 ч. Бийск: Изд-во Алтайского государственного технического университета, 2014. Ч. 1. С. 88–92.
5. Доморозов А.Н., Нгуен Ван Ньань. Анализ методов диагностирования технического состояния систем подвесок АТС на современных вибростендах // Вестник ИргТУ. 2010. № 5 (45). С. 131–134.
6. Федотов А.И., Лысенко А.В., Тихов-Тинников Д.А. Контроль технического состояния подвески автомобилей в условиях эксплуатации методом движения по окружности // Автомобиль для Сибири и Крайнего Севера: конструкция, эксплуатация, экономика: материалы 90-й Междунар. науч.-техн. конф. Ассоциации автомобильных инженеров (Иркутск, 9–10 апреля 2015 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. С. 232–238.
7. Федотов А.И., Кузнецов Н.Ю., Лысенко А.В., Тихов-Тинников Д.А. Измерительный комплекс с гироскопами для диагностирования элементов подвески в дорожных условиях. Авиамашиностроение и транспорт Сибири: сборник статей VII Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск 13–16 апреля 2016 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. С. 186–191.
8. Fedotov A.I., Kuznetsov N.Y., Lysenko A.V., Vlasov V.G. Car Suspension System Monitoring under Road Conditions // AIP Conference Proceedings. Vol. 1915. Issue 1. <https://doi.org/10.1063/1.5017362>
9. Дербаремдигер А.Д. Амортизаторы транспортных машин. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1985. 200 с.
10. Парфеньева И.Е. Оценка технического уровня гидравлических амортизаторов автомобилей // Технические науки – от теории к практике. 2013. № 21. С. 37–45.
11. Мусарский Р.А. Анализ и оптимизация характеристик сопротивления гидравлических амортизаторов // Вестник ИжГТУ им. М.Т. Калашникова. 2016. № 1 (69). С. 13–16.
12. Поздеев А.В., Похлебин А.В., Чернышов К.В., Мухидинов Ю.М., Мухучев Ш.М. Определение неисправностей гидравлических амортизаторов при стендовых испытаниях // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия: Наземные транспортные системы. 2015. Т. 12. № 6 (166). С. 71–76.
13. Черепанов Л.А., Литошин М.А. Стенд для испытаний амортизаторов подвески автомобилей // Вектор науки Тольяттинского государственного универ-



ситета. 2015. № 1 (31). С. 41–45.

14. Хачатуров А.А. Динамика системы «дорога –

шина – автомобиль – водитель». М.: Машиностроение, 1976. 535 с.

References

1. Raimpel' J. *Shassi avtomobilya: amortizatory, shiny i kolyosa* [Vehicle chassis: shock absorbers, tires and wheels]. Moscow: Machine Building, 1986, 320 p.
2. Derbaremdiker A.D. *Gidravlicheskie amortizatory avtomobilei* [Vehicle hydraulic shock absorbers]. Moscow: Machine Building, 1969, 236 p. (In Russian).
3. Ryabov I.M., Chernyshov K.V., Gasanov M.M., Muhuchev Sh.M. On safety problem in the operation of vehicles with faulty shock absorbers. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Izvestia VSTU]. 2014, no. 19 (146), pp. 103–106. (In Russian).
4. Kan'shin V.A., Tret'yakov A.M. *Analiz metodov diagnostirovaniya amortizatorov na sovremennykh vibrostendakh* [Analysis of diagnosis methods of shock absorbers on modern vibrating tables]. *Materialy II Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Sostoyanie i perspektivy razvitiya social'no-kul'turnogo i tekhnicheskogo servisa"* [Proceedings of II All-Russia scientific and practical conference with international participation "State and development prospects of social, cultural and technical service"]. In 2 parts. Biisk: Altai state technical university Publ., 2014. Part 1, pp. 88–92. (In Russian).
5. Domorozov A.N., Nguen Van N'an'. Analysis of diagnostic methods for technical condition of motor transport suspension systems on modern vibrostands. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2010, no. 5 (45), pp. 131–134. (In Russian).
6. Fedotov A.I., Lysenko A.V., Tihov-Tinnikov D.A. *Kontrol' tekhnicheskogo sostoyaniya podveski avtomobilej v usloviyakh ekspluatatsii metodom dvizheniya po okruzhnosti* [Control of vehicle suspension technical condition when in operation by the circular movement method]. *Materialy 90-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii Assotsiatsii avtomobil'nyh inzhenerov "Avtomobil' dlya Sibiri i Krainego Severa: konstruktsiya, ekspluatatsiya, ekonomika"* [Proceedings of 90th International scientific and technical conference of the Association of Automotive Engineers "Vehicles for Siberia and the Far North: Design, Operation, Economy"]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2015, pp. 232–238. (In Russian).
7. Fedotov A.I., Kuznecov N.Yu., Lysenko A.V., Tihov-Tinnikov D.A. *Izmeritel'nyi kompleks s giroskopami dlya diagnostirovaniya elementov podveski v dorozhnykh usloviyakh* [Measurement system with gyroscopes for suspension element diagnosis in road conditions]. *Sbornik statei VII Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroyeniye i transport Sibiri"* [Collection of articles of VII All-Russia scientific and practical conference "Aircraft and Mechanical Engineering and Transport of Siberia"]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2016, pp. 186–191. (In Russian).
8. Fedotov A.I., Kuznetsov N.Y., Lysenko A.V., Vlasov V.G. Car Suspension System Monitoring under Road Conditions. AIP Conference Proceedings. 2017, vol. 1915, issue 1. <https://doi.org/10.1063/1.5017362>
9. Derbaremdiker A.D. *Amortizatory transportnykh mashin* [Shock Absorbers of transport machines]. Moscow: Machine Building Publ., 1985, 200 p. (In Russian).
10. Parfen'eva I.E. Assessment of the technical level of hydraulic shock absorbers of cars. *Tekhnicheskie nauki – ot teorii k praktike* [Technical sciences – from theory to practice]. 2013, no. 21, pp. 37–45. (In Russian).
11. Musarskij R.A. Analysis and optimization of resistance characteristics of hydraulic shock absorbers. *Vestnik IzhGTU im. M.T. Kalashnikova* [Bulletin Kalashnikov Izhevsk State Technical University]. 2016, no. 1 (69), pp. 13–16. (In Russian).
12. Pozdeev A.V., Pohlebin A.V., Chernyshov K.V., Muhidinov Yu.M., Muhuchev Sh.M. Troubleshooting of hydraulic shock absorbers under bench tests. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Nazemnye transportnye sistemy* [Izvestia VSTU. Series: surface transport systems]. 2015, vol. 12, no. 6 (166), pp. 71–76. (In Russian).
13. Cherepanov L.A., Litoshin M.A. The stand for car suspension bumper test. *Vektor nauki Tol'yatinskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vector of science of Togliatti state University]. 2015, no. 1 (31), pp. 41–45. (In Russian).
14. Hachaturov A.A. *Dinamika sistemy "doroga – shina – avtomobil' – voditel'"* [Dynamics of the system "road – tire – vehicle – driver"]. Moscow: Machine Building Publ., 1976, 535 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 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: vestnik@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-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск,
(3952) 40-58-57.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: pgp@istu.edu

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал
№ 7 (138) 2018

Редактор О.А. Терновская
Художественный редактор Е.В. Хохрин
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова
Перевод на английский язык В.В. Батицкой
Верстка А.В. Куртовой

Выход в свет 31.07.2018 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 31.
Тираж 500 экз. Заказ 211. Поз. плана 3н.

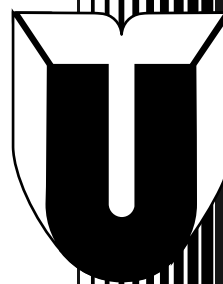
Издание распространяется **бесплатно**

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

