

Том 22, № 9

2018

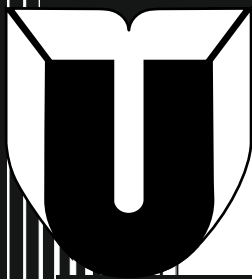
ISSN 1814-3520 (print)
ISSN 2500-1590 (online)

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, № 9

2018

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 22, № 9

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 Бертольд, 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. 9

2018

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

Editorial board

KORNIakov 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)

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

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

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

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

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

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

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

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

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: pqp@istu.edu

СОДЕРЖАНИЕ

Машиностроение и машиноведение

- | | |
|---|----|
| ❏ Бойко А.Ф., Воронкова М.Н. Анализ методов получения микроотверстий. Часть 1..... | 10 |
| ❏ Верещагин В.Ю., Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С. Концепция проектирования эффективного покрытия путем моделирования рациональных напряжений в режущем инструменте под заданные условия его эксплуатации..... | 20 |
| ❏ Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Вьонг Куанг Чык. Рычажные связи в задачах коррекции динамического состояния вибростенда..... | 28 |
| ❏ Лонцих П.А., Кунаков Е.П., Коршунова Е.И., Ковригина И.В. Анализ цифровых технологий, применяемых в машиностроительной отрасли..... | 42 |
| ❏ Лэ Хонг Куанг, Зайдес С.А. Аналитическое определение напряженного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами..... | 50 |
| ❏ Пятых А.С. Повышение производительности и качества обработки отверстий на основе оценки динамики процесса резания..... | 67 |

Информатика, вычислительная техника и управление

- | | |
|--|-----|
| ❏ Дунаев А.М. Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования..... | 82 |
| ❏ Лопатин А.Г., Брыков Б.А., Вент Д.П. Исследование динамических свойств промыленного реактора синтеза полиметилметакрилата... | 91 |
| ❏ Петров А.В. К вопросу автоматизации построения имитационных моделей..... | 101 |
| ❏ Станкевич Т.С. Разработка метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения..... | 111 |
| ❏ Такайшвили Л.Н. Имитационные модели в исследованиях перспектив развития угольной промышленности восточных регионов России..... | 121 |
| ❏ Хапусов В.Г., Ермаков А.А., Подкорытов А.А. Исследование влияния расхода топлива на давление уходящих газов в дымовой трубе газовоздушного тракта котельного агрегата как объекта с распределенными параметрами..... | 133 |

ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

СОДЕРЖАНИЕ



Энергетика



- Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей в искусственных сооружениях железнодорожного транспорта..... 141
- Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибeko P.B. Коммутатор сетевого напряжения для управления светодиодными осветительными приборами с помощью низкочастотной PLC-технологии..... 152
- Таиров Э.А., Таирова Е.В., Хан П.В. Газодинамическая модель критического и докритического истечения пароводяной смеси через слой шаровых частиц..... 162



Металлургия и материаловедение



- Молдурушку М.О., Чульдum A.Ф., Тас-оол Л.Х. Исследование влияния температуры на равновесные состояния системы при обжиге отходов кобальтового производства..... 173
- Сосипаторов А.И., Панченко Г.М., Высотин В.В., Винокурова М.А., Чикин А.Ю. Перспектива использования реагента-депрессора отечественного производства при флотации углистых золотосодержащих руд..... 184



Транспорт



- Корчагин П.А., Летопольский А.Б., Тетерина И.А. Результаты исследований работоспособности модернизированного оборудования трубоукладчика..... 194
- Федотов А.И., Марков А.С. Влияние износа рисунка протектора беговой дорожки шины на её сцепные свойства при торможении на стенде в блоковом режиме..... 205

PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 22, No. 9

2018

CONTENTS



Mechanical Engineering and Machine Science

- | | |
|---|---|
| <p>☞ Boyko A.F., Voronkova M.N. Analysis of micro hole drilling methods. Part 1.....</p> <p>☞ Vereshchagin V.Y., Mokritskii B.Ya., Vereshchagina A.S. The concept of designing an effective coating for a cutting tool under specified operation conditions by modeling its rational stresses.....</p> <p>☞ Eliseev S.V., Kuznetsov N.K., Vuong Quang Truc. Lever ties in vibration shaker dynamic state correction problems.....</p> <p>☞ Lontsikh P.A., Kunakov E.P., Korshunova E.I., Kovrigina I.V. Analysis of digital technologies used in mechanical engineering.....</p> <p>☞ Le Hong Quang, Zaides S.A. Analytical determination of the cylindrical part stressed state under transverse burnishing by flat plates.....</p> <p>☞ Pyatykh A.S. Improving effective output and hole processing quality based on cutting process dynamics estimation.....</p> | <p>10</p> <p>20</p> <p>28</p> <p>42</p> <p>50</p> <p>67</p> |
|---|---|



Information Science, Computer Engineering and Management

- | | |
|--|---|
| <p>☞ Dunaev A.M. Procedure of optimal logical diagnosis algorithm construction.....</p> <p>☞ Lopatin A.G., Brykov B.A., Vent D.P. Studying dynamic properties of an industrial reactor for polymethyl methacrylate synthesis.....</p> <p>☞ Petrov A.V. To the problem of simulation modeling automation.....</p> <p>☞ Stankevich T.S. Development of operational prediction method of forest fire dynamics based on artificial intelligence and deep machine learning...</p> <p>☞ Takaishvili L.N. Simulation models in the studies of coal industry development in the eastern regions of Russia.....</p> <p>☞ Khapusov V.G., Ermakov A.A., Podkorytov A.A. Study of fuel consumption effect on flue gas pressure in the stack of the air and gas path of a boiler unit as an object with distributed parameters.....</p> | <p>82</p> <p>91</p> <p>101</p> <p>111</p> <p>121</p> <p>133</p> |
|--|---|



PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

CONTENTS



Power Engineering



- **Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V.** Modeling of electromagnetic fields in railway engineering structures..... 141
- **Kopytov S.M., Ulianov A.V., Shibeko R.V.** Network voltage switch to control LED lighting appliances using low-frequency PLC-technology... 152
- **Tairov E.A., Tairova E.V., Khan P.V.** Gas dynamics model of critical and subcritical liquid-vapor mixture flow through a bed of spherical particles..... 162



Metallurgy and Materials Science



- **Moldurushku M.O., Chuldum A.F., Tas-ool L.H.** Studying temperature effect on system equilibrium states at cobalt production waste roasting..... 173
- **Sosipatorov A.I., Panchenko G.M., Vysotin V.V., Vinokurova M.A., Chikin A.Yu.** Application prospects of domestic depressor reagent under carbonaceous gold-bearing ore flotation..... 184

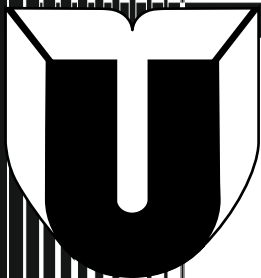


Transport



- **Korchagin P.A., Letopolsky A.B., Teterina I.A.** Results of working capacity research of pipelayer improved equipment..... 194
- **Fedotov A.I., Markov A.S.** Effect of tire tread pattern wear on tire grip under test bench braking in a locked mode..... 205





ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Уважаемые читатели!

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

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

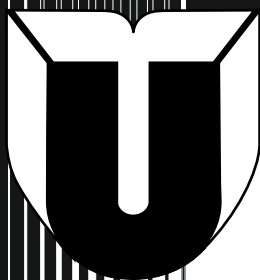
«Вестник ИрГТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую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

«Вестник ИрГТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- 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", University OXFORD, Scientific Indexing Services (SIS), Directory of Open Access Journals (DOAJ). It is sent to the Russian Book Chamber and All-Russian Institute for Scientific and Technical Information (VINITI) RAS. Each article is assigned a digital indicator DOI.

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

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

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

Editorial Board





Обзорная статья / Review article

УДК: 621.9.048

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-10-19>

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ПОЛУЧЕНИЯ МИКРООТВЕРСТИЙ. ЧАСТЬ 1

© А.Ф. Бойко¹, М.Н. Воронкова²

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова,
308012, Российская Федерация, г. Белгород, ул. Костюкова, 46.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В статье дан обзор методов получения микроотверстий, нашедших промышленное применение в мировой технологии машиностроения. Описана сущность механических, электрофизических, электрохимических методов литья, сборки, напыления. Показаны технологические возможности методов, их достоинства и недостатки. Дана сравнительная характеристика методов, указаны области их применения с целью определения наиболее эффективного метода получения прецизионных микроотверстий с точки зрения обеспечения требуемого качества отверстий и производительности процесса. **МЕТОДЫ.** Методической основой исследований является сравнительный научно-технический анализ мировых промышленных технологий получения микроотверстий в историческом развитии. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Описаны физико-техническая сущность десяти методов получения микроотверстий, их технологические возможности и применяемое оборудование. Дана количественная и качественная оценка технологических процессов. **ВЫВОДЫ.** Определены рациональные области использования пяти методов получения микроотверстий. Разработаны перспективные направления совершенствования технологии прецизионных микроотверстий.

Ключевые слова: микроотверстия, прокольный пуансон, лазерная прошивка, электронно-лучевая обработка, ионный пучок.

Информация о статье. Дата поступления 23 июля 2018 г.; дата принятия к печати 28 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Бойко А.Ф., Воронкова М.Н. Анализ методов получения микроотверстий. Часть 1 // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 10–19. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-10-19

ANALYSIS OF MICRO HOLE DRILLING METHODS. PART 1

A.F. Boyko, M.N. Voronkova

Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov,
46, Kostyukov St., Belgorod, 308012, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The article gives an overview of micro hole drilling methods which have found industrial application in the world mechanical engineering technology. The essence of the methods of mechanical, electrophysical, electrochemical methods of casting, assembly and spraying is described. The technological capabilities of methods, their advantages and disadvantages are shown as well as their comparative characteristics. The application areas of methods are specified in order to determine the most effective method of drilling precision micro holes in terms of ensuring the required hole quality and process performance. **METHODS.** A comparative scientific and technical analysis of the world industrial technologies of obtaining micro holes in the historical development forms the methodological basis of the research. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The article gives a physico-technical characteristic of ten methods of micro hole drilling, describes their process capabilities and used equipment. The quantitative and qualitative assessment of

¹Бойко Анатолий Федорович, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, e-mail: boyko_1947@bk.ru

Anatoly F. Boyko, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: boyko_1947@bk.ru

²Воронкова Марина Николаевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, e-mail: mkuzko@mail.ru

Marina N. Voronkova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: mkuzko@mail.ru



technological processes is given as well. **CONCLUSIONS.** The rational fields have been determined for the application of five methods of micro hole drilling. The promising directions of improving precision micro hole technology have been developed.

Keywords: *micro holes, pin-hole punch, laser drilling, electron beam treatment, ion beam*

Information about the article. Received July 23, 2018; accepted for publication August 28, 2018 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Boyko A.F., Voronkova M.N. Analysis of micro hole drilling methods. Part 1. *Proceedings of Irkutsk State Technical University. Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 9, pp. 10–19. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-10-19 (In Russian)

Введение

История создания и развития методов получения микроотверстий знает более десятка их разновидностей в зависимости от свойств материала обрабатываемых деталей, формы и размеров микроотверстий, требований к точности и качеству поверхности отверстий, уровня развития машиностроительных технологий. Среди них наиболее известные и описанные в литературе [1–9]:

1. Механические методы.
2. Ионно-оптический.
3. Электронно-лучевой.
4. Лазерные.

5. Электрохимический.
 6. Струйный электрохимический.
 7. Метод литья.
 8. Метод сборки.
 9. Групповой способ вакуумного напыления.
 10. Электроэрозионный.
- Каждый метод имеет свои физические особенности, диапазон технологических возможностей, определенные технико-экономические показатели и в конкретный исторический период находил определенную производственную нишу в промышленности.

Цель исследования

В последние десятилетия в целом ряде отраслей промышленности (электронной, приборостроительной, медицинской, авиационной, аэрокосмической, инструментальной, автомобильной, электротехнической, оборонной и др.) существенно возросла потребность в высокопроизводительной обработке прецизионных микроотверстий диаметром 0,01–0,2 мм с точностью 1–5 мкм и шероховатостью обрабо-

танной поверхности $Ra = 0,1–0,5$ мкм, в том числе глубоких отверстий с соотношением глубины к диаметру до 25–30. В связи с этим целью настоящего исследования является определение наиболее эффективного метода получения прецизионных микроотверстий с точки зрения обеспечения требуемого качества отверстий и производительности процесса.

Материалы и методы исследования

Механические методы получения микроотверстий. Одним из ранних механических методов получения микроотверстий является *метод давления*.

Технологический процесс получения микроотверстий давлением использовали

для отверстий диаметром от 0,04 мм и более в деталях из нержавеющей и других сталей толщиной до 0,5 мм. Он включает ряд операций, выполняемых в определенной последовательности (рис. 1) [10].

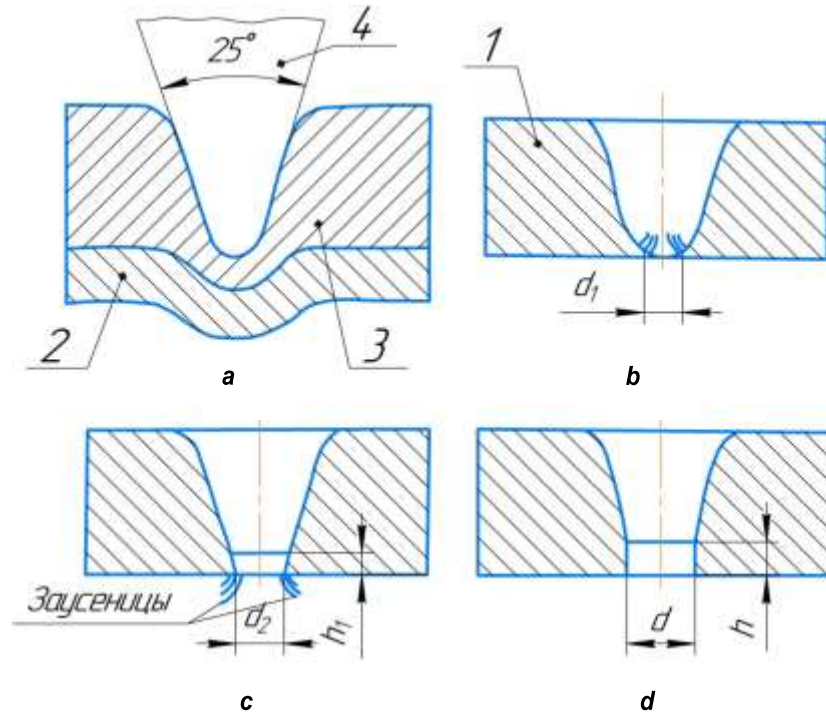


Рис. 1. Последовательность операций получения микроотверстий давлением в деталях толщиной до 0,5 мм: 1 – деталь; 2 – прокладка; 3 – лунка; 4 – проколочный пуансон

Fig. 1. Sequence of operations of micro hole punching in the parts with the thickness of up to 0.5 mm: 1 – part; 2 – spacer; 3 – indentation cup; 4 – pin-hole punch

Первой является операция по деформированию материала с целью образования лунок на его лицевой стороне и выпуклостей на противоположной (рис. 1, а). Для этого используют специальные проколочные пуансоны и иногда проколочные пуансоны, выполненные с расчетом на вскрытие отверстий. Размеры этих пуансонов выбирают в зависимости от толщины прокалываемого материала.

При внедрении проколочного пуансона 4 в доньшко детали 1, установленной на мягкой алюминиевой прокладке 2, происходит деформирование материала с образованием лунки на лицевой ее стороне и выпуклости 3 на противоположной (рис. 1, а). Затем производится сошлифовка выпуклостей с использованием абразивной пасты до появления отверстий, травление в кипящей концентрированной азотной кислоте и промывка водой. В результате этих процедур получается коническое отверстие диаметром в основании $d_1 = 0,03\text{--}0,04$ мм (рис. 1, б). Внутри канала образуются заусенцы. Затем отверстие обрабатывают

коническим калибровочным пуансоном. При этом заусенцы выдавливаются наружу, формируется конический поясик высотой h_1 и диаметром d_2 (рис. 1, с). После этого производят обработку цилиндрическим калибровочным пуансоном. При этом образуется цилиндрический поясик диаметром d и высотой h (рис. 1, д). Выдавленные заусенцы удаляют путем полирования доньшка детали.

В деталях толщиной 0,7–1,0 мм и более отверстия малого диаметра получают путем увеличения числа последовательных переходов обработки давлением. При этом пуансоны с малыми поперечными сечениями используют для продавливания остающейся тонкой перемычки, соответствующей цилиндрическому каналу.

Классическое сверление лезвийным инструментом отверстий диаметром менее 0,1 мм невозможно из-за отсутствия соответствующих сверл. Стандартные сверла диаметром 0,1 мм начали производить в 1960-х гг. [11]. Это спиральные малоразмерные сверла диаметром 0,1–1 мм с



утолщенным цилиндрическим хвостовиком³.

Однако на некоторых предприятиях были разработаны и использовались для сверления неглубоких микроотверстий специальные сверла диаметром 0,03–0,25 мм [1]. При этом применяли высокоточные пневматические станки, в которых вращение инструменту сообщалось воздушной турбинкой, выполненной за одно целое со шпинделем, имеющим подшипники в виде воздушных подушек. Применение воздушных турбинок исключает влияние вибраций, возникающих при вращении электродвигателя и шкивов. Скорость вращения регулируется изменением давления поступающего воздуха с помощью игольчатого клапана. Наибольшая частота вращения двигателя – 150 000 об./мин. Величина подачи инструмента: для стали – $0,01d$ мм/об., для чугуна – $0,03d$ мм/об., где d – диаметр сверла.

В начале 70-х гг. прошлого столетия в электронной промышленности СССР для освоения серийного производства рубиновых капилляров, используемых для микросварки полупроводников приборов, была разработана технология абразивного сверления микроотверстия.

Капиллярное отверстие в рубине сверлили на специально разработанной установке, имеющей воздушную турбину на 50–100 тыс. об./мин.

В качестве абразива применялась алмазная паста АСМ20 и АП1П. Общее время на абразивное сверление одного рубинового капилляра составляло 55–60 мин, причем 40 мин затрачивалось на сверление конуса.

Шероховатость обработанной поверхности $R_a = 0,1–0,05$ мкм, точность размеров отверстия – 0,002–0,003 мм.

По этой технологии получали микроотверстия диаметром от 0,02 мм и выше. Установка оснащалась специальным при-

способлением, оптическим прибором с 25-кратным увеличением и координатным столом с ценой деления отсчетных устройств 0,005 мм.

Таким образом, механические методы изготовления микроотверстий имеют весьма ограниченные возможности, особенно для получения отверстий диаметром менее 0,1 мм. Невозможно также получать микроотверстия в высокопрочных, твердых материалах (закаленные стали, высоколегированные стали, твердые сплавы, минералокерамика и др.), а также отверстия глубиной более пяти диаметров. Следует отметить, что механическими методами изготовления микроотверстий владели только высококвалифицированные специалисты, имевшие иногда статус «тульского левши». Кроме того, механические методы были весьма трудоемки и не обеспечивали высокого качества изделий и стабильности процесса.

Развитие машиностроения, создание новых методов обработки материалов, возросшая потребность в производстве прецизионных деталей с микроотверстиями потребовали разработки более эффективных методов изготовления микроотверстий. К числу таких методов относятся электрофизикохимические методы.

Ионно-оптический метод получения микроотверстий основан на явлении катодного распыления, сопровождающего тлеющий разряд. Прошивание отверстия производят при помощи сфокусированного пучка ионов, направленного на обрабатываемую деталь [11]. Ионный пучок может пробивать отверстия в любых материалах любой твердости.

Для получения ионного пучка и осуществления процесса сверления микроотверстий используют ионную пушку, представляющую собой электровакуумный прибор, состоящий из герметизированного

³ГОСТ 8034-76. Сверла спиральные малоразмерные диаметром от 0,1 до 1,5 мм с утолщенным цилиндрическим хвостовиком. Технические условия; утв. и введен в действие постановлением Госкомстандартов Совета Министров СССР от 06.10.1976 г. № 2292 (взамен ГОСТ 8034-67) / GOST 8034-76. Spiral small drills with the diameter from 0.1 to 1.5 mm with a thickened cylindrical tail. Specifications; approved and put into effect by the resolution of the State Committee for Standards of the Council of Ministers of the USSR of 6 November 1976 No. 2292 (in replacement of GOST 8034-67).



корпуса, внутри которого находится анод и катод, снабженный отверстием для выхода пучка. В ионной пушке используют катодно-лучевой газоразрядный источник ионов. Для этого между анодом и катодом прикладывают напряжение 12–25 кВ и устанавливают вакуум порядка 10^{-1} мм рт. ст., вследствие чего возникает самостоятельный газовый разряд. Используемая в пушке система электродов вызывает своеобразный процесс – автофокусировку ионов. В результате пучок фокусируется в тонкий шнур.

Момент появления микроотверстия в обрабатываемой детали регистрируют визуально через стеклянное окно или микроскоп. В момент появления в обрабатываемой детали отверстия его диаметр составляет 2–3 мкм. Если установку сразу же после появления отверстия не выключать, то отверстие начнет увеличиваться в диаметре. Меняя время обработки (рассверливания), можно получать отверстия заданного диаметра.

Таким образом, достоинствами ионно-оптического метода получения микроотверстий является возможность обрабатывать любые токопроводящие и нетокопроводящие материалы, а также широкий диапазон: от нескольких микрон до десятых долей миллиметра.

К недостаткам данного метода следует отнести:

- невысокую производительность процесса;
- нецилиндричность (конусность) получаемых отверстий и существенный разброс их размеров;
- проблематичность получения глубоких отверстий (свыше 10 диаметров);
- зависимость качества обработанной поверхности от структуры (зернистости) материала детали;
- необходимость дополнительного времени для создания вакуума в системе;
- невысокую точность относительно положения полученного отверстия.

Электронно-лучевой способ прошивки отверстий основан на выделении тепла при торможении электронного

пучка, проникающего в материал обрабатываемой детали. Обработка ведется в разряженной воздушной среде при давлении 10^{-1} – 10^{-4} Па. Вакуум обеспечивает необходимую длину пробега электронов, предохраняет от загрязнения элементы электронно-оптической системы и исключает пробой промежутка между катодом и анодом. Для сообщения электронам необходимой кинетической энергии прикладывают электрическое поле с напряжением 50–150 кВ, которое создается между катодом, эмитирующим электроны, и анодом, под которым расположена обрабатываемая деталь. Электронный луч фокусируется на детали в пятно диаметром 1–100 мкм при помощи магнитной и электростатической системы электронно-лучевой установки.

Диаметр пятна соответствует диаметру прошиваемого отверстия на выходе. На входе диаметр отверстия получается больше, чем на выходе, т. е. отверстие получается конусным. Кроме того, кромки на входе и выходе отверстия имеют плавные скругления. Уклон стенок отверстия составляет от десятых долей до нескольких градусов. На рис. 2 показана форма продольного сечения сквозного отверстия при размерной обработке электронным лучом.

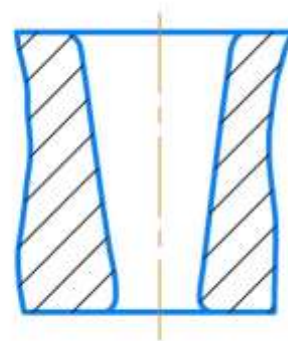


Рис. 2. Типовой профиль отверстий, полученных электронно-лучевой обработкой
Fig. 2. Typical profile of holes obtained by electron beam processing

Точность размеров и качество поверхности при прошивке микроотверстий зависят от рода материала, размеров от-



верстия (диаметра, глубины), параметров процесса, характеристик электронной пушки. Точность получаемых отверстий соответствует 7–9 качеству, шероховатость поверхности $R_z = 2\text{--}10$ мкм.

Малые размеры сечения электронного луча как технологического инструмента определили его применение прежде всего в микроэлектронике для изготовления, например, микросхем с высокой плотностью монтажа, масок и трафаретов. Особой разновидностью размерной электронно-лучевой обработки является перфорация: получение мелких сквозных отверстий в металлических и керамических фильтрах, в пористых охлаждающих элементах камер сгорания ракетных двигателей, в лопатках турбин и др. Производительность перфорации зависит от мощности луча и толщины заготовки и может достигать 10^5 отверстий в секунду. Используется электронно-лучевая обработка для прошивки малых отверстий в фильерах из различных твердых сплавов, керамики, стекла. Обычно глубина отверстий в фильерах составляет 1–3 мм, количество отверстий в фильерах достигает 500. В микроэлектронике распространена также электронно-лучевая резка заготовок из полупроводниковых материалов и ферритов на отдельные малоразмерные элементы и прошивание в них отверстий.

Таким образом, достоинствами электронно-лучевого метода получения микроотверстий являются:

- возможность обработки всего диапазона микроотверстий: от 1 мкм до десятых долей миллиметра;
- возможность обработки любых материалов: токопроводящих, диэлектриков, полупроводников;
- высокая производительность процесса, особенно при обработке диэлектриков и перфорации тонколистовых материалов;
- возможность получения относительно глубоких отверстий: для металлов – до 15–20 диаметров отверстия, для диэлектриков – до 100–200 диаметров.

Недостатки метода:

- нецилиндричность получаемых отверстий (конусность, скругление кромок на входе и выходе отверстий);
- невозможность или трудность получения шероховатости обработанной поверхности, $R_z < 1\text{--}2$ мкм;
- потеря производительности, связанная с необходимостью дополнительного времени для создания вакуума в рабочей камере;
- невозможность получения высокой точности положения получаемого отверстия относительно элементов конструкции детали;
- повышенная электроопасность от поражения электрическим током, ускоряющим напряжением до 150 кВ.

Лазерная прошивка микроотверстий основана на плавлении и испарении материалов в результате воздействия поверхностного или объемного (в зависимости от свойств облучаемого вещества) источника тепла, представляющего собой сфокусированный на малом участке интенсивный монохроматический когерентный световой луч. Как и электронно-лучевая обработка, лазерная технология относится к лучевым методам, однако имеет существенное преимущество: обработка осуществляется в обычной воздушной среде. При этом плотность потока энергии достигает 10^{13} Вт/м².

Получение микроотверстий осуществляется чаще всего с помощью твердотельных импульсных лазеров за один или несколько импульсов. Многоимпульсная обработка применяется для получения глубоких отверстий малых диаметров с большим отношением глубины к диаметру, а также отверстий высокой точности.

Путем сочетания многоимпульсной обработки с фокусированием луча в виде цилиндрической световой трубки представляется возможным получать глубокие отверстия 7–9 качества точности.

Экспериментально установлено, что дно отверстия при лазерной обработке формируется в основном за счет испарения, а боковые стенки – за счет плавления



материала обрабатываемого изделия и вытекания жидкости при избыточном давлении паров в полости отверстия. Геометрическая форма отверстия существенно зависит от места расположения фокального пятна относительно поверхности детали. Следует отметить, что максимальный диаметр отверстия находится у его входной части. То есть, как и при электронно-лучевой обработке, отверстия получаются конусными, но лазерная технология более производительна и экономична.

Метод получения микроотверстий с помощью лазера нашел распространение при изготовлении фильер, подшипников из кристаллических материалов для измерительных приборов, форсунок, часовых рубиновых камней, изделий электронной техники.

С большой эффективностью лазерная технология используется для прошивки малых отверстий в керамических материалах, в особенности при изготовлении отверстий диаметром, равным десятым и сотым долям миллиметра, и глубина которых более чем в 2 раза превышает диаметр [12].

В начале 70-х гг. прошлого столетия лазерную технологию стали использовать для прошивки микроотверстий в технических рубиновых камнях, годовой объем производства которых в мире достигает 1 млрд штук. В основном они применяются в часовой и приборостроительной промышленности. В настоящее время большинство часовых камней обрабатывают на лазерном оборудовании [13]. На нем прошивают отверстия диаметром 50–400 мкм и глубиной 200–750 мкм.

Перспективными направлениями для развития лазерной технологии прошивки микроотверстий являются:

- получение микроотверстий диаметром менее 3 мкм, создание лазеров с малой (менее 0,4 мкм) длиной волны излучения;
- повышение качества микроотверстий без снижения производительности создания мощных импульсных лазеров с длительностью импульса менее 10 мкм и ча-

стотой следования импульсов до 1 кГц, в том числе получение микроотверстий методом вырезки (трепанации).

Таким образом, достоинствами лазерного метода получения микроотверстий являются:

- широкий диапазон обработки микроотверстий: от 5 мкм и выше;
 - возможность обработки любых материалов: токопроводящих, диэлектриков, полупроводников, независимо от их механических свойств;
 - высокая производительность процесса, которая составляет от нескольких до сотен отверстий в минуту;
 - возможность получения относительно глубоких отверстий – до 15–20 диаметров отверстия;
 - возможность осуществления процесса в обычной воздушной среде.
- Недостатки метода:
- нецилиндричность получаемых отверстий: конусность, скругление кромок на входе и выходе отверстий;
 - трудность получения шероховатости обработанной поверхности, $R_z < 1\text{--}2$ мкм;
 - невозможность получения высокой (микронной) точности расположения оси получаемого отверстия относительно элементов конструкции детали (в том числе из-за погрешности формы поперечного сечения лазерного луча);
 - низкий КПД лазерных установок – не более 30%;
 - повышенная опасность для глаз обслуживающего персонала от лазерного излучения как прямого, так и отраженного.

Электрохимическая прошивка отверстий малых диаметров представляет собой размерную электрохимическую обработку цельным катодом-инструментом без прокачки электролита через межэлектродный промежуток.

Инструмент для выполнения прошивочной операции (рис. 3) изготавливали из вольфрамовой проволоки 1, отожженной в печи при 1200–1300°C в течение 4–5 ч с последующим охлаждением вместе с печью [14].

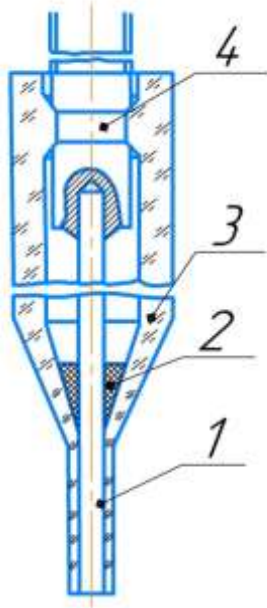


Рис. 3. Катод-инструмент для прошивки отверстий малых диаметров:

1 – вольфрамовая проволока;

2 – эпоксидная композиция;

3 – стеклянная трубка

Fig. 3. Cathode tool for flashing holes of small diameters:

1 – tungsten wire; 2 – epoxy composition;

3 – glass tube

В медном стержне 4 диаметром 6 мм высверливали отверстие, в котором с помощью припоя ПС_р–70 крепили зачищенный конец вольфрамовой проволоки длиной 50–70 мм. На другом конце стержня нарезали резьбу для удобства присоединения к источнику питания. Корпус электрода-инструмента изготавливали из стеклянной трубки 3, с одной стороны которой вытягивали капилляр, помещали в него свободный конец вольфрамовой проволоки и спаивали металл в стекло. В стенке корпуса с помощью тонкого пламени газовой горелки прожигали отверстие, в которое вводили эпоксидную композицию 2. Боковое отверстие в корпусе запаивали стек-

лом, а верхний конец корпуса после разогрева до размягчения обжимали вокруг медного стержня и проводили отжиг остеклованного электрода. Для изготовления рабочей части катода конец капилляра с впаянной в него вольфрамовой проволокой отрезали алмазным кругом. Равномерный слой стеклянной изоляции на боковой поверхности катода получали растворением стекла в плавиковой кислоте на специальном приспособлении, обеспечивающем вращение катода вокруг его оси с минимальным радиальным биением. Так как травление стекла происходило и с торцевой поверхности, то выступающую вольфрамовую проволоку стравливали в смеси соляной и азотной кислот.

Способ был применен для прошивки отверстий в твердосплавном инструменте для микросварки.

Прошивка осуществлялась в двух электролитах: фосфатном (30% H₃PO₄) и хлоридно-щелочном (5% NH₄Cl + 10% N₂CO₃ + 3% ЭДТАNa). В этих электролитах достигается полное растворение продуктов анодных реакций в результате связывания их в комплексные соединения, что очень важно при малой площади обработки.

Достоинствами электрохимического способа прошивки малых отверстий являются:

- простота технологии и оборудования;
- хорошее качество обработанной поверхности ($R_a = 0,4–0,8$ мкм).

Недостатки метода:

- низкая производительность процесса (0,02–0,07 мм/мин);
- невысокая точность обработки;
- экологическая опасность, связанная с применением химически опасных электролитов.

Выводы

1. Исторически технология получения микроотверстий начиналась с механических методов. Однако эти методы имели ограниченные возможности по диапазону

диаметров обрабатываемых отверстий, их глубины, достигаемой точности, производительности процесса.

2. Возможности технологии получе-



ния микроотверстий были существенно расширены разработкой и промышленным применением электрофизикохимических методов обработки как по диапазону геометрических параметров отверстий, так и качественных показателей профиля. Впервые удалось получить отверстия диаметром несколько микрометров, стало возможным получать микроотверстия глубиной более 100 диаметров.

3. С точки зрения оптимального сочетания требований по качеству микроотверстий и производительности процесса наиболее перспективными являются электрофизико-химические методы обработки, среди которых наиболее эффективной представляется электроэрозионная обработка, которая будет подробно проанализирована во второй части статьи.

Библиографический список

1. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. Белгород: Изд-во БГТУ, 2010. 314 с.
2. Бойко А.Ф., Лойко А.М. Особенности процесса естественной эвакуации продуктов обработки при электроэрозионной прошивке микроотверстий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 11. С. 128–131.
3. Кудеников Е.Ю., Бойко А.Ф. Исследование профиля прецизионных отверстий, получаемых методом электроэрозионной обработки // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2017. № 3. С. 103–106.
4. Биленко С.В., Сариллов М.Ю., Бурдасов Е.Н., Маслацова А.Э. Исследование процесса электроэрозионного прошивания отверстий // Фундаментальные исследования. 2012. № 9 (ч. 4). С. 882–888.
5. Оглезнев Н.Д., Абляз Т.Р. Влияние режимов электроэрозионной обработки на точность получения отверстий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. № 4 (2). С. 393–398.
6. Оглезнев Н.Д. Современное состояние и перспективы развития электроэрозионной обработки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1 (2). С. 490–493.
7. Елисеев Ю.С., Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка авиационно-космической техники. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 437 с.
8. Ставицкий И.Б., Битюцкая Ю.Л. Назначение рациональных режимов электро-эрозионной обработки платины с использованием решений тепловой задачи Стефана // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 11. С. 60–71. DOI: 10.7463/1115.0826317
9. Саушкин Б.П. Электроэрозионная обработка: состояние и перспективы развития. Часть 2. Прошивка отверстий // РИТМ: ремонт, инновации, технологии, модернизации. 2012. № 9 (77). С. 20–24.
10. Красников В.Ф. Микротехнология // Машиностроитель. 1972. № 11. С. 41–43.
11. Левинсон Е.М. Отверстия малых размеров (методы получения). Л.: Машиностроение. 1977. 152 с.
12. Крылов К.И., Прокопенко В.Т., Митрофанов А.С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л.: Машиностроение. 1998. 276 с.
13. Reiner S. Laserausrichtung in der Fertigung // Phys und Didakt. 1976. 4. No. 3. P. 205–223.
14. Зенин В.В., Кондратьев В.П., Водянов Ю.М., Рыжков Ф.Н. Электрохимическая прошивка отверстий малых диаметров в твердосплавном инструменте для микросварки // Электронная обработка материалов. 1975. № 5. С. 85–87.

References

1. Boiko A.F. *Effektivnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya elektroerozionnoi proshivki pretsizionnykh mikrootverstii* [Effective technology and equipment for electro-erosive piercing of precision micro-holes]. Belgorod: BGTU Publ., 2010, 314 p. (In Russian)
2. Boiko A.F., Loiko A.M. Features of process of natural evacuation of products of erosion in case of electrical discharge machining microopenings. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2016, no. 11, pp. 128–131. (In Russian)
3. Kudenikov E.Yu., Boiko A.F. Research profile precision holes obtained by electrical discharge machining. *Vestnik Belgorodskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta im. V.G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov]. 2017, no. 3, pp. 103–106. (In Russian)
4. Bilenko S.V., Sarilov M.Yu., Burdasov E.N., Maslatsova A.E. Study of the process of hole-making by electrical discharge machining. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research]. 2012, no. 9 (part 4), pp. 882–888. (In Russian)
5. Ogleznev N.D., Ablyaz T.R. Influence of electroerosive processing modes on accuracy of receiving holes. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013, vol. 15,



no. 4 (2), pp. 393–398. (In Russian)

6. Ogleznev N.D. Current state and prospects of development the electroerosive processing. *Izvestiya Samar-skogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2014, vol. 16, no. 1 (2), pp. 490–493. (In Russian)

7. Eliseev Yu.S., Saushkin B.P. Elektroerozionnaya obrabotka aviatsionno-kosmicheskoi tekhniki [Electro-erosive processing of aerospace equipment]. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ., 2010, 437 p. (In Russian)

8. Stavitskii I.B., Bityutskaya Yu.L. Electrical discharge platinum machining optimization using Stefan problem solutions. // *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana* [Science and Education. Bauman Moscow State Technical University]. 2015, no. 11, pp. 60–71. DOI: 10.7463/1115.0826317. (In Russian)

9. Saushkin B.P. Electrical discharge machining: condition and development prospects. Part 2. Hole Punching.

Критерии авторства

Бойко А.Ф., Воронкова М.Н. имеют на статью равные авторские права и несут равную ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RITM: remont, innovatsii, tekhnologii, modernizatsii [RHYTHM: Repair, Innovation, Technology, Modernization]. 2012, no. 9 (77), pp. 20–24. (In Russian)

10. Krasnikov V.F. Microtechnology. *Mashinostroitel'* [Machine Builder]. 1972, no. 11, pp. 41–43. (In Russian)

11. Levinson E.M. *Otverstiya mal'kh razmerov (metody polucheniya)* [Small size holes (production methods)]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1977, 152 p. (In Russian)

12. Krylov K.I., Prokopenko V.T., Mitrofanov A.S. *Primenenie lazerov v mashinostroenii i priborostroenii* [Application of lasers in mechanical engineering and instrument making]. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1998, 276 p. (In Russian)

13. Reiner S. Laserais herkzeng in der Fertigung. *Phys und Didakt*. 1976, 4, no. 3, pp. 205–223.

14. Zenin V.V., Kondrat'ev V.P., Vodyanov Yu.M., Ryzhkov F.N. Electrochemical piercing of small diameter holes in a carbide tool for microwelding. *Elektron-naya obrabotka materialov* [Electronic Processing of Materials]. 1975, no. 5, pp. 85–87. (In Russian)

Authorship criteria

Boyko A.F., Voronkova M.N. have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621. 91. 01

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-20-27>

КОНЦЕПЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНОГО ПОКРЫТИЯ ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В РЕЖУЩЕМ ИНСТРУМЕНТЕ ПОД ЗАДАННЫЕ УСЛОВИЯ ЕГО ЭКСПЛУАТАЦИИ

© В.Ю. Верещагин¹, Б.Я. Мокрицкий², А.С. Верещагина³

¹Новосибирский государственный педагогический университет,
630126, Российская Федерация, г. Новосибирск, ул. Виллюйская, 28.

²Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
681013, Российская Федерация, г. Комсомольск-на-Амуре, пр-т Ленина, 27.

³Новосибирский государственный технический университет,
630073, Российская Федерация, г. Новосибирск, пр-т Карла Маркса, 20.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Спроектировать инструментальный материал под заданные условия эксплуатации с требуемым периодом износостойкости затруднительно из-за отсутствия соответствующих методик. Авторами настоящей статьи разработана такая методика для концевой фрезеровки твердосплавными фрезами. В качестве параметра, имеющего необходимый уровень влияния на работоспособность инструмента, принята величина внутренних напряжений в режущем клине инструмента и характер распределения этих напряжений. В качестве средства, влияющего на величину и характер распределения напряжений, приняты покрытия на инструменте. Многообразие существующих архитектур (конструкция, состав, толщина общая и толщина каждого из слоев и т.д.) покрытий затрудняет выбор рационального из них. Перебор покрытий при экспериментальной апробации длителен и дорог. Поэтому возникла потребность в компьютерном моделировании. **МЕТОДЫ.** Для моделирования использован пакет программ ANSYS. На его основе смоделированы напряжения в режущем клине зубьев концевой твердосплавной фрезы без покрытия и с несколькими различными покрытиями. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Экспериментально установлены наиболее рациональные инструментальные материалы по периоду их износостойкости. Они сопоставлены с смоделированными напряжениями при заданных условиях эксплуатации. Установлено, что меньшие величины напряжений соответствуют большим периодам износостойкости инструмента. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Изменением архитектуры покрытий при компьютерном моделировании напряжений подобраны такие покрытия, которые обеспечивают требуемый запас периода износостойкости инструмента. Им принято 10%-е превышение заданного периода износостойкости, а именно – 40 мин. Из числа таких покрытий выбрано технологически наиболее удобное. Оно нанесено на твердосплавный инструмент, испытанный в реальных условиях эксплуатации. Превышение заданного периода износостойкости составило 8–15%, что принимается допустимым.

Ключевые слова: режущий инструмент, процесс резания, период износостойкости, покрытия, напряжения, моделирование.

Информация о статье. Дата поступления 02 августа 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

¹Верещагин Владислав Юрьевич, старший преподаватель кафедры информационных, сервисных и общетехнических дисциплин, e-mail: klirickv@yandex.ru,
Vladislav Yu. Vereshchagin, Senior Lecturer of the Department of Information, Service and General Technical Sciences, e-mail: klirickv@yandex.ru

²Мокрицкий Борис Яковлевич, доктор технических наук, профессор кафедры технологии машиностроения, e-mail: boris@knastu.ru
Boris Ya. Mokritsky, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: boris@knastu.ru

³Верещагина Александра Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии машиностроения, e-mail: vereshhagina@corp.nstu.ru
Aleksandra S. Vereshchagina, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, e-mail: vereshhagina@corp.nstu.ru



Формат цитирования. Верещагин В.Ю., Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С. Концепция проектирования эффективного покрытия путем моделирования рациональных напряжений в режущем инструменте под заданные условия его эксплуатации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 20–27. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-20-27

THE CONCEPT OF DESIGNING AN EFFECTIVE COATING FOR A CUTTING TOOL UNDER SPECIFIED OPERATION CONDITIONS BY MODELING ITS RATIONAL STRESSES

V.Yu. Vereshchagin, B.Ya. Mokritsky, A.S. Vereshchagina

Novosibirsk State Pedagogical University,
28, Viluiskaya St., Novosibirsk, 630126, Russian Federation
Komsomolsk-na-Amure State University,
27, Lenin pr., Komsomolsk-na-Amure, 681013, Russian Federation
Novosibirsk State Technical University
20, Karl Marks pr., Novosibirsk, 630073, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. Designing of a rational tool material for the specified operation conditions with the required durability period is difficult due to the lack of appropriate methods. The authors of the article have developed such a method for end milling by carbide-tipped cutters. The value of internal stresses in the cutting wedge of the tool and the distribution nature of these stresses are taken as a parameter having the necessary level of influence on the tool working capacity. Tool coating is accepted as a means influencing the magnitude and nature of stress distribution. The variety of existing architectures of coatings (design, composition, thickness, total thickness and thickness of each layer, etc.) makes it difficult to choose the rational one. Searching for a coating in an experimental approbation is time-consuming and expensive. Therefore, there is the need for computer modeling. **METHODS.** Using ANSYS software package as a basis for modeling, the stresses is simulated in the cutting wedge of the carbide end mill teeth without coating and with several different coatings. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The most rational tool materials have been experimentally determined by their durability period. They have been compared with the simulated stresses under specified operation conditions. It is found that lower stresses correspond to longer wear resistance periods of the tool. **CONCLUSION.** By changing the coating architecture in computer simulation of stresses the coatings are selected that provide the required margin of tool wear resistance. They have a 10% excess (40 min) of the specified period of wear resistance. The most technologically convenient coating is chosen from these ones. It is applied to a hard alloy tool tested in real operation conditions. The specified period of wear resistance has exceeded by 8–15%. It is accepted as valid.

Keywords: cutting tool, cutting process, wear resistance period, coatings, stresses, simulation

Information about the article. Received August 02, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Vereshchagin V.Y., Mokritskii B.Ya., Vereshchagina A.S. The concept of designing an effective coating for a cutting tool under specified operation conditions by modeling its rational stresses. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 20–27. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-20-27 (In Russian)

Введение

Одним из эффективных методов повышения работоспособности режущего инструмента является нанесение на его рабочие поверхности покрытий как однослойных, так и многослойных [1, 2]. Эффективность их использования различна, прирост работоспособности инструмента можно оценить лишь на основании экспериментальных исследований. Надежных методик прогнозирования работоспособности режущего инструмента с покрытиями нет. В силу этого актуальной задачей является разработка методики прогнозирования работоспособности на этапе проектирования покрытия. Особенно важным здесь является разработка методики проектирования покрытия под заданные условия эксплуатации режущего инструмента.

Доля инструментальных затрат в структуре себестоимости изготавливаемого изделия растет и для авиационных труднообрабатываемых материалов составляет десятки процентов. Необходимы меры по их снижению. Например, необходимо выбирать такой металлорежущий инструмент, период работоспособности которого кратен или равен требуемому. Избы-



точный период работоспособности, как правило, востребовать не удастся, т.е. он полностью не используется, но он вошел в стоимость инструмента. Недостаточный период работоспособности ведет к еще большим затратам. Проектирование инструмента с требуемым периодом работоспособности под заданные условия его эксплуатации затруднительно по ряду ограничений, слишком много параметров влияет на работоспособность. С нашей точки зрения, одним из таких параметров может быть величина, а также характер распределения внутренних напряжений в режущем клине металлорежущего инструмента. Это совокупный параметр, не имеющий прямой связи с периодом работоспособности, но наша методология построена на известной концепции – при равных условиях меньшей величине напряжений соответствует больший период работоспособности. При таком подходе в качестве управляющего фактора для обеспечения требуемого периода работоспособности инструмента может быть использование покрытия той или иной архитектуры (конструкция покрытия, его общая толщина и толщина каждого из слоев, структура и состав слоев и т.д.) на твердосплавном инструменте. Многообразие существующих архитектур покрытий затрудняет выбор наиболее рационального покрытия. При экспериментальной апробации их выбор длителен и дорог. Возникла потребность в компьютерном моделировании.

Методологическая концепция

В основу моделирования концевой фрезерования твердосплавными фрезами положен следующий методологический подход (концепция).

Работоспособность (например, период износостойкости) металлорежущего инструмента тем выше, чем меньше сила резания.

Сила резания прямо пропорционально связана с напряжениями, возникающими в режущем инструменте. Следовательно, если обеспечить в режущем инструменте напряжения меньшей величины, то следует ожидать большую его работоспособность.

Управлять величиной напряжений можно путем применения тех или иных покрытий на субстрате инструментального материала, т.е. благодаря архитектурованию покрытия под заданные условия эксплуатации инструмента [2].

На этапе разработки эффективного инструментального материала (субстрат + покрытие) целесообразно проведение компьютерного моделирования. Например, моделирование напряжений в зависимости от применяемого покрытия. В основе такого моделирования может лежать стремление обеспечить минимальный уровень напряжений, что должно привести к соответствующему приросту работоспособности инструмента.

Проверке адекватности этой концепции посвящена данная работа.

Результаты исследования и их обсуждение

Зависимость между силой резания и максимальными напряжениями в режущем клине инструмента получена С.И. Петрушиным для токарной обработки^{4,5}. Она описана выражением с прямо пропорциональной зависимостью максимальных напряжений от силы резания ($\sigma_{\max} \sim P$):

⁴Петрушин С.И. Теоретические основы оптимизации режущей части лезвийных инструментов: дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 1995. 307 с. / Petrushin S.I. Theoretical bases of edge tool cutting part optimization: Doctoral Dissertation in technical sciences. Moscow, 1995. 307 p.

⁵Петрушин С. И., Бобрович И. М., Корчуганова М. А. Оптимальное проектирование формы режущей части лезвийных инструментов: учебное пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 1999. 91 с. / Petrushin S.I., Bobrovich I.M., Korchuganova M.A. Optimal design of the edge tool cutting part shape: Learning Aids. Tomsk: TPU Publ., 1999. 91 p.



$$\sigma_{\max} = \frac{P_y \cdot [\cos \gamma \cdot \sin(\gamma + \Theta) - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha - \Theta) + \beta \cdot \cos \Theta] + P_z \cdot [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha - \Theta) - \cos \gamma \cdot \cos(\gamma + \Theta - \beta \cdot \sin \Theta)]}{2 \cdot r \cdot [\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma - \beta^2 + (\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)^2]} \quad (1)$$

где P_y – радиальная составляющая силы резания; P_z – главная составляющая сила резания; α – главный задний угол; γ – передний угол; r , Θ – полярные координаты.

С определенными ограничениями данная формула может быть применена и к другим видам лезвийной обработки. Нами это выполнено применительно к фрезерованию концевыми фрезами.

При изучении распределения напряжений в режущем клине инструмента рассматривали контактные напряжения σ_z и σ_y , действующие соответственно в направлении, параллельном передней поверхности и перпендикулярном к ней.

Исследование напряженного состояния режущего клина проводилось компьютерным моделированием с использованием пакета программ ANSYS [3].

Рассматривали следующие инструментальные материалы: субстрат – твердый сплав марки BK8; однослойное покрытие из нитрида титана TiN толщиной 5 мкм; однослойное композиционное покрытие (TiAl)N толщиной 5 мкм; трехслойное покрытие Ti+TiN+(TiAl)N общей толщиной 7 мкм; трехслойное покрытие Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 6 мкм; трехслойное покрытие Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм.

Именно эти инструментальные материалы выбраны в силу того, что по ним имеются сведения в литературе, например, отдельные результаты приведены А.А. Верещакой [4].

Пример полей (картин распределения) напряжений для таких инструментальных материалов показан на рис. 1 и 2 (числа на полях напряжений показывают линию напряжений в МПа).

Для проверки представленной гипотезы проведено сопоставление результатов вычисления эквивалентных напряжений с экспериментальными данными (приведены в диссертационной работе А.В. Чихранова)⁶ по износостойкости фрез с нанесенными на него покрытиями. Под эквивалентными напряжениями понимаем

$$\sigma_{\text{эк}} = \sqrt{\sigma_{z\max}^2 + \sigma_{y\max}^2}, \quad (2)$$

где $\sigma_{z\max}$ – расчетные максимальные напряжения по передней поверхности режущего клина; $\sigma_{y\max}$ – расчетные максимальные напряжения по задней поверхности режущего клина.

Стойкостные исследования проводились при контурном фрезеровании уступа высотой 3 мм двухзубой и трехзубой концевой фрезой диаметром 16 мм каждая. Заготовка детали выполнена из стали марки 12X18H10T. Варьировались в диапазоне: подача на зуб – 0,05–0,2 мм/зуб; глубина резания – 0,5–10,0 мм; скорость резания – 50–250 м/мин; ширина встречного фрезерования составляла 12 мм. Фото используемых фрез представлено на рис. 3.

Варианты износа фрез показаны на рис. 4.

На рис. 5 приведены графики, иллюстрирующие износостойкость фрез, имеющих различное покрытие. Фрезерование проводилось на станке модели DMC50 с ЧПУ, время работы до достижения износа 0,4 мм по задней грани.

⁶Чихранов А.В. Повышение работоспособности режущего инструмента путем разработки и применения многоэлементных износостойких покрытий на основе модифицированного нитрида титана: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01. Ульяновск, 2006. 314 с. / Chikhranov A.V. Improving cutting tool efficiency through the development and application of multi-element wear-resistant coatings based on modified titanium nitride: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.03.01. Ulyanovsk, 2006. 314 p.

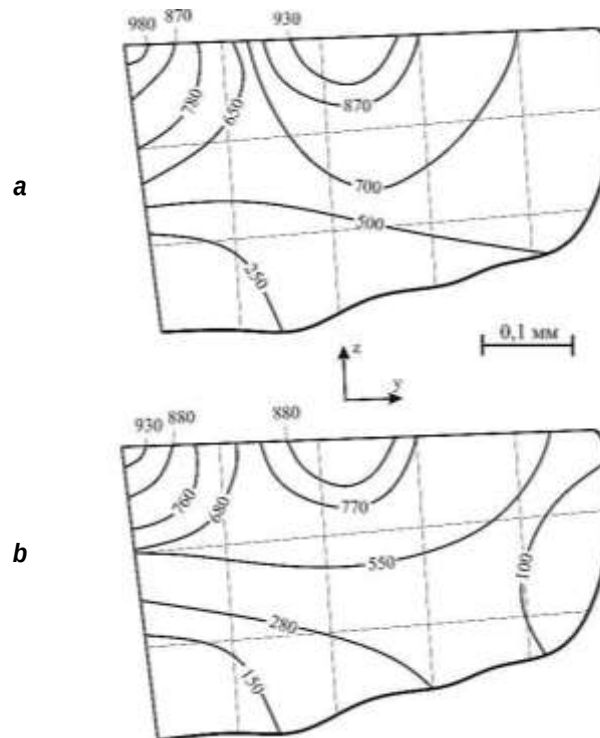


Рис. 1. Поля напряжений σ_z в режущем клине (зубе) твердосплавной (марки BK8) концевой фрезы: а – без покрытия; б – с трехслойным покрытием $Ti+TiN+(TiAlCr)N$ общей толщиной 6 мкм

Fig. 1. Stress fields σ_z in the wedge (tooth) of the carbide (VK8 grade) end mill: a – without coating; b – with a three-layer coating of $Ti + TiN + (TiAlCr)N$ and the total thickness of 6 μm

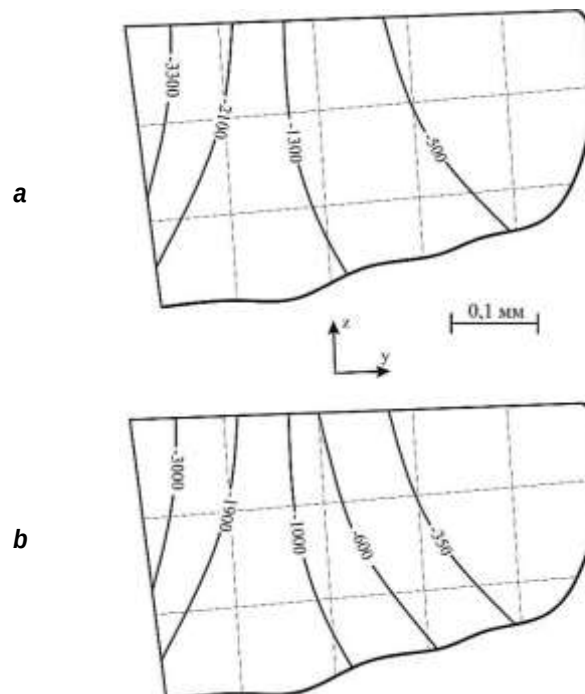


Рис. 2. Поля напряжений σ_y в режущем клине (зубе) твердосплавной (марки BK8) концевой фрезы: а – без покрытия; б – с трехслойным покрытием $Ti+TiN+(TiAlCr)N$ общей толщиной 6 мкм

Fig. 2. Stress fields σ_y in the wedge (tooth) of the carbide (VK8 grade) end mill: a – without coating; b – with a three-layer coating of $Ti + TiN + (TiAlCr)N$ and the total thickness of 6 μm

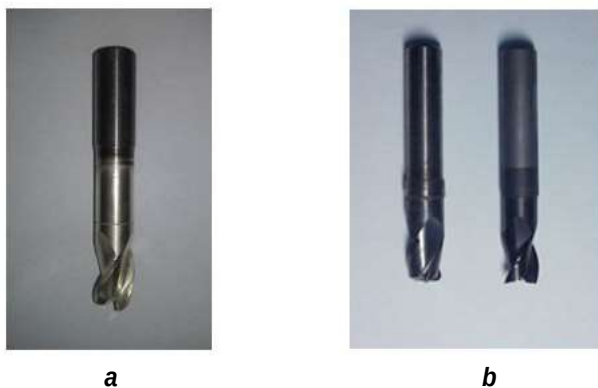


Рис. 3. А – фреза с покрытием TiN; б – фрезы с покрытием (TiAl)N
Fig. 3. A – TiN coated milling cutter; b – (TiAl)N coated milling cutters



Рис. 4. А – износ зуба фрезы по задней грани; б – передняя поверхность зуба фрезы с элементами разрушения режущей кромки и налипом стружки
Fig. 4. A – wear of the cutter tooth on the rear edge; b – front surface of the cutter tooth with the elements of cutting edge destruction and chip cakes

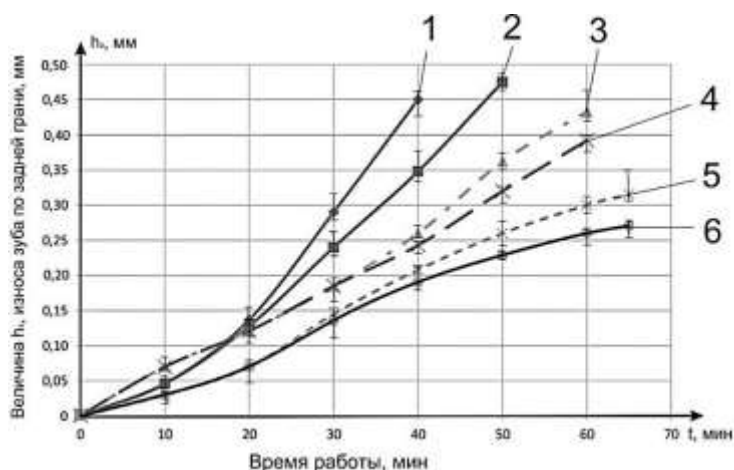


Рис. 5. Износостойкость фрез с различным покрытием при скорости резания – 120 мм/мин, подаче на зуб – 0,08 мм/зуб, глубине резания – 10 мм:

- 1 – без покрытия; 2 – покрытие TiN толщиной 5 мкм; 3 – покрытие (TiAl)N толщиной 5 мкм;
4 – покрытие Ti+TiN+(TiAl)N общей толщиной 7 мкм;
5 – покрытие Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм;
6 – покрытие Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 6 мкм

Fig. 5. Durability of mills with different coatings at the cutting speed of 120 mm/min, feed to tooth – 0.08 mm/tooth, cutting depth – 10 mm:

- 1 – without coating; 2 – TiN coating of 5 μm thickness; 3 – (TiAl)N coating of 5 μm thickness;
4 – Ti + TiN + (TiAl)N coating with the total thickness of 7 μm ;
5 – Ti + TiN + (TiAlCr) N coating with the total thickness of 10 μm ;
6 – Ti + TiN + (TiAlCr) N coating with the total thickness of 6 μm



Ниже приведены уравнения полиномов, описывающие эти зависимости:

$$h_3(t) = 0,0002t^2 + 0,0031t - 0,0019; \quad (3)$$

$$h_3(t) = 0,00009t^2 + 0,0051t - 0,005; \quad (4)$$

$$h_3(t) = 0,00003t^2 + 0,005t + 0,0069; \quad (5)$$

$$h_3(t) = 0,00002t^2 + 0,0055t + 0,0059; \quad (6)$$

$$h_3(t) = -0,000002t^3 + 0,0002t^2 + 0,0012t + 0,001; \quad (7)$$

$$h_3(t) = -0,000001t^3 + 0,0001t^2 + 0,0017t + 0,0004. \quad (8)$$

Характер изменения величин эквивалентных напряжений для различных инструментальных материалов проиллюстрирован на рис. 6. Из диаграммы видно, что применение покрытий снижает уровень напряжений. Максимальное снижение напряжений (на 0,24 ГПа) возможно при применении покрытия Ti+TiN+(TiAlCr)N общей толщиной 6 мкм, поскольку именно этому покрытию свойственно достижение максимальной износостойкости инструмента (прирост на 20 мин).

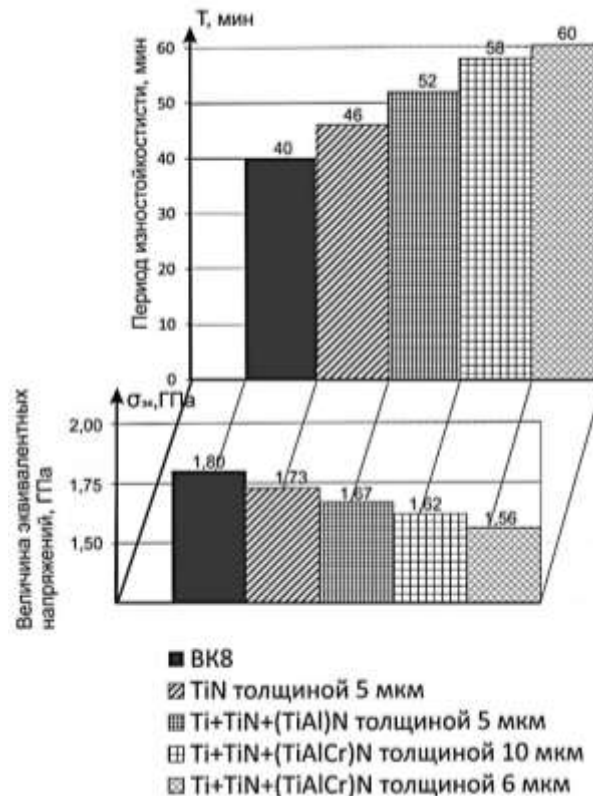


Рис. 6. Изменение периода износостойкости T фрез и максимальных эквивалентных напряжений ($\sigma_{экв}$) в режущем клине при различном исполнении (субстрат + покрытие) инструмента для обработки материала 12X18H10T

Fig. 6. Variation of the T mill durability period and maximum equivalent stresses (σ_{eq}) in the wedge for the various designs (substrate + coating) of the tool for 12X18H10T material processing

Сопоставление экспериментальных данных по износостойкости фрез с результатами моделирования максимальных эквивалентных напряжений показало обратную зависимость стойкости от эквивалентных напряжений: увеличение стойкости инструмента происходит вследствие снижения эквивалентных напряжений.



Заключение

1. Применение покрытий изменяет картину полей напряжений – снижает величину максимальных напряжений до 1,15 раз, что, очевидно, связано со снижением силы резания. Не исключено влияние покрытия как теплового барьера.

2. Использование для моделирования пакета программ ANSYS позволяет воссоздать условия для обеспечения рационального распределения напряжений, в том числе учесть изменение архитектуры покрытий, отличающихся толщиной слоя на 0,4 мкм.

3. Для указанных условий эксплуатации наиболее эффективно применение покрытия $Ti+TiN+(TiAlCr)N$ при общей толщине 6 мкм.

4. Приведенные примеры доказывают правомерность принятой методологии исследований. Указанная концепция подтверждена. Она сводится к тому, что под заданные условия эксплуатации инструмента можно спроектировать эффективный по износостойкости инструментальный материал, используя в качестве управления архитектуру покрытия субстрата инструментального материала. При этом в качестве критерия управления можно использовать картины распределения полей напряжений в режущем клине, а построение картин полей напряжений можно осуществлять путем компьютерного моделирования с применением пакета программ ANSYS.

Библиографический список

1. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 312 с.
2. Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П. Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2 (98). С. 18–32.
3. Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю., Мокрицкая Е.Б., Пячин С.А., Бельх С.В., Верещагина А.С. Составные твердосплавные концевые фрезы как альтернатива цельным и сборным твердосплавным концевым фрезам // СТИН. 2016. № 6. С. 7–10.
4. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Batako A.D.L., Mokritskii B.J., Aksenenko A.Y., Sitnikov N.N. Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method // Nanomaterials and Nanotechnology. 2017. Vol. 7. P. 1–13. DOI: 10.1177/1847980416680805

References

1. Tabakov V.P. *Formirovanie iznosostoikikh ionno-plazmennyykh pokrytii rezhushchego instrumenta* [Formation of wear-resistant ion-plasma coatings for cutting tools]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2008, 312 p. (In Russian)
2. Vereshchaka A.S., Grigor'ev S.N., Tabakov V.P. Methodological principles of creation the functional coatings of new generation for cutting tool manufacture. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening Technologies and Coatings]. 2013, no. 2 (98), pp. 18–32. (In Russian)
3. Mokritskii B.Ya., Vereshchagin V.Yu., Mokritskaya E.B., Pyachin S.A., Belykh S.V., Vereshchagina A.S. Composite hard-alloy end mills as an alternative to solid and assembled carbide end mills. *STIN* [Russian Engineering Research]. 2016, no. 6, pp. 7–10. (In Russian)
4. Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Batako A.D.L., Mokritskii B.J., Aksenenko A.Y., Sitnikov N.N. Improvement of structure and quality of nanoscale multilayered composite coatings, deposited by filtered cathodic vacuum arc deposition method. *Nanomaterials and Nanotechnology*. 2017, vol. 7, pp. 1–13. DOI: 10.1177/1847980416680805

Критерии авторства

Верещагин В.Ю., Мокрицкий Б.Я., Верещагина А.С. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Vereshchagin V.Yu., Mokritsky B.Ya., Vereshchagina 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 interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.534, 62.752, 629.4.015

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-28-41>

РЫЧАЖНЫЕ СВЯЗИ В ЗАДАЧАХ КОРРЕКЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВИБРОСТЕНДА

© С.В. Елисеев¹, Н.К. Кузнецов², Выонг Куанг Чык³

^{1,3}Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

²Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. Вибрационные технологические процессы, в которых реализуются взаимодействия сыпучей рабочей среды с обрабатываемыми деталями крупных размеров, например, лопасти вертолетов, требуют соответствующих настроек вибрационных полей. **ЦЕЛЬ** исследования заключалась в разработке метода построения математических моделей, обеспечивающих формирование однородных вибрационных полей за счет введения в системы дополнительных связей. Показаны конструктивно-технические возможности реализации таких подходов.

МЕТОДЫ. Предложен метод настройки вибрационного технологического стенда, рабочий орган которого может совершать плоские колебания, создающие структуру однородного вибрационного поля или близкого к нему в определенных частотных диапазонах. Использованы методы структурного математического моделирования и аналитический аппарат теории автоматического управления. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Приведены результаты вычислительного эксперимента. Предложены аналитические соотношения для настройки параметров вибростенда.

ВЫВОДЫ. Идея развиваемого подхода заключается во введении в структуру вибростенда механизмов как дополнительных связей, обладающих возможностями изменения приведенных масс и жесткостей системы. На основе использования передаточных функций межпарциальных связей разработана методика определения параметров системы, обеспечивающих при действии двух инерционных вибровозбудителей однородную структуру вибрационного поля.

Ключевые слова: *вибрационные технологические машины, механические колебательные системы, передаточные функции, вибрационные поля, амплитудно-частотные характеристики.*

Информация о статье. Дата поступления 14 августа 2018 г.; дата принятия к печати 31 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Елисеев С.В., Кузнецов Н.К., Выонг Куанг Чык. Рычажные связи в задачах коррекции динамического состояния вибростенда // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 28–41. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-28-41

LEVER TIES IN VIBRATION SHAKER DYNAMIC STATE CORRECTION PROBLEMS

S.V. Eliseev, N.K. Kuznetsov, Vuong Quang Truc

Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

¹Елисеев Сергей Викторович, доктор технических наук, профессор, директор Научно-образовательного центра современных технологий, системного анализа и моделирования, e-mail: eliseev_s@inbox.ru
Sergey V. Eliseev, Doctor of technical sciences, Professor, Director of the Scientific-Educational Center of Modern Technologies, System Analysis and Modeling, e-mail: eliseev_s@inbox.ru

²Кузнецов Николай Константинович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой конструирования и стандартизации в машиностроении, e-mail: knik@istu.edu
Nikolai K. Kuznetsov, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Design and Standardization in Mechanical Engineering, e-mail: knik@istu.edu

³Выонг Куанг Чык, аспирант, e-mail: trucvq1990@gmail.com
Vuong Quang Truc, Postgraduate, e-mail: trucvq1990@gmail.com



ABSTRACT. A special adjustment of vibration fields is required for vibrational technological processes where loose working medium interacts with the large-size parts being machined, for example, helicopter blades. The **PURPOSE** of the research is to develop a method for constructing mathematical models ensuring the formation of homogeneous vibrational fields through introducing of additional constraints into systems. The article shows constructive and technical possibilities of implementing such approaches. **METHODS.** The authors propose an adjustment method for a vibration shaker, the working element of which can perform flat oscillations creating the structure of a uniform vibrational field or the field close to it in certain frequency ranges. The paper uses the methods of structural mathematical modeling and the analytical tools of the theory of automatic control. **RESULTS.** The article presents the results of the computational experiment. The analytic relations are proposed for adjusting the vibration shaker parameters. **CONCLUSIONS.** The idea of the developed approach is to introduce the mechanisms in the structure of the vibration shaker as additional constraints that have the potential to change the reduced masses and stiffness of the system. A method for determining system parameters ensuring a homogeneous structure of the vibrational field under the action of two inertial exciters has been developed on the basis of the use of transfer functions of inter-partial ties.

Keywords: vibration technological machines, mechanical oscillatory systems, transfer functions, vibrational fields, amplitude-frequency characteristics

Information about the article. Received August 14, 2018; accepted for publication August 31, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Eliseev S.V., Kuznetsov N.K., Vuong Quang Truc. Lever ties in vibration shaker dynamic state correction problems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 9, pp. 28–41. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-28-41 (In Russian)

Введение

Вибрационные технологические процессы в последние годы получили достаточно широкое распространение при сортировке и классификации сыпучих материалов, их транспортировке, а также в различных процессах при модификации и изменении свойств поверхностей деталей при вибрационных взаимодействиях с рабочей средой [1–3]. Создание необходимых технологических режимов в работе вибрационных стендов и поддержание динамических состояний технологических систем является комплексной задачей динамики, требующей учета особенностей формирования движений рабочих органов, часто представляемых в виде твердых тел, совершающих плоские или пространственные движения⁴ [4, 5]. В качестве расчетных схем вибрационных технологических машин обычно используются механические колебательные системы с несколькими степенями свободы и сосредоточенными параметрами. Одной из основных характеристик вибростенда является распределение амплитуд колебаний по отдельным точкам, расположенным по длине рабочего органа. В такой постановке задачи большое значение приобретают возможности управления формообразованием вибрационных полей или их структур, что требует развития соответствующих технологий построения математических моделей и оценки возможного спектра динамических свойств, а также разработки способов и средств корректировки вибрационных полей. Во многих практических случаях определяющим свойством технологической вибрационной машины является стабильность и однородность структуры вибрационного поля, что во многом предопределяет качество технологических процессов.

В настоящем исследовании развивается метод корректировки динамического состояния вибрационного стенда, рабочий орган которого совершает плоское движение и имеет две степени свободы, корректировка динамических свойств при этом обеспечивается введением дополнительных связей в виде рычажных устройств для преобразования движения.

⁴Вибрации в технике: справочник; в 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / под ред. Э.Э. Лавенделла. М.: Машиностроение, 1981. 509 с. / Vibrations in engineering: handbook; in 6 volumes. Vol. 4: Vibration processes and machines/ under edition of E.E. Lavendell. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1981, 509 p.



Некоторые общие положения. Постановка задачи исследования

Особенности вибрационных технологических машин и соответствующие расчетные схемы представлены в работах [6–9]. В рассматриваемой ситуации важным является внимание к двум направлениям оценки возможностей целенаправленного изменения динамических состояний при одновременном совместном действии двух внешних силовых возмущений инерционного типа при необходимости обеспечения движений рабочего органа вибростенда по вертикали. При этом желательным является обнуление угловых колебаний относительно центра масс. Расчетная схема вибростенда приведена на рис. 1.

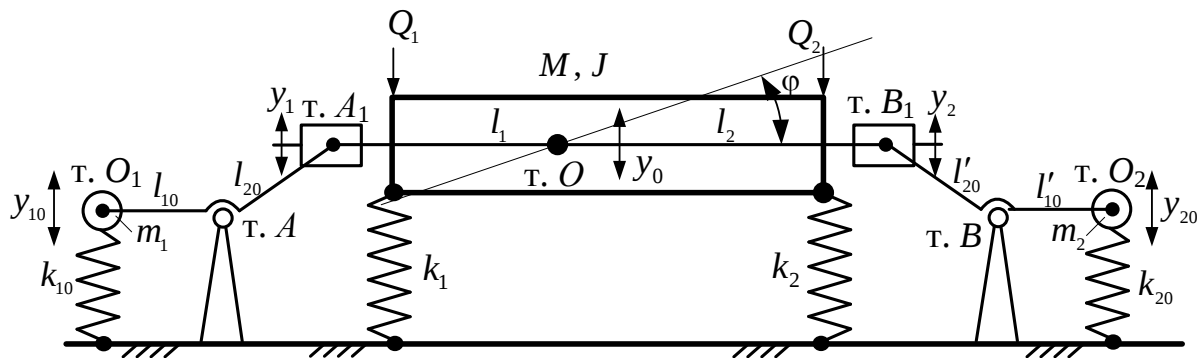


Рис. 1. Принципиальная схема вибростенда инерционного возбуждения с рычажными корректорами

Fig. 1. Principal scheme of an inertial excitation vibration shaker with lever correctors

Рабочий орган вибростенда в виде твердого тела массой M и моментом инерции J опирается на упругие элементы (линейные пружины) с коэффициентами жесткости k_1 и k_2 . В точках A и B закреплены рычаги второго рода⁵ [10], на концах которых в точках O_1 и O_2 установлены пригрузки с массами m_1 и m_2 соответственно. В точках A_1 и B_1 рычаги устанавливаются на ползуны, обеспечивающие необходимые условия для совместных движений элементов системы. Пригрузки m_1 и m_2 в свою очередь опираются на поверхность через упругие элементы с коэффициентами жесткости k_{10} и k_{20} . Рычажные устройства обеспечивают постоянные связи между координатами элементов системы y_{10} и y_1 , y_{20} и y_2 , что определяется соотношениями:

$$y_{10} = y_1 \cdot i_1; \quad (1)$$

$$y_{20} = y_2 \cdot i_2, \quad (2)$$

где i_1 и i_2 являются передаточными отношениями рычагов, представляющих собой отношение длин плеч (i является отрицательной величиной, так как точки A_1 и O_1 , а также B_2 и O_2 движутся в разных направлениях).

Система обладает линейными свойствами и совершает малые колебания относительно положения статического равновесия. Силы сопротивления в данном случае полагаются малыми и не учитываются. Движение системы рассматривается в системе координат y_1 и y_2 , связанной с неподвижным базисом. Силовые возмущения в системе формируются инерционными устройствами и в данном случае являются синфазными гармоническими колебаниями одной амплитуды.

⁵Крайнев А.Ф. Словарь-справочник по механизмам. М.: Машиностроение, 1987. 560 с. / Krainev A.F. Glossary dictionary on mechanisms. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1987, 560 p.



Для построения математической модели системы в виде двух обыкновенных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами используются уравнения Лагранжа 2-го рода [11].

Выражения для кинетической и потенциальной энергий могут быть записаны в виде:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{y}_0^2 + \frac{1}{2} J \dot{\phi}^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{y}_{10}^2 + \frac{1}{2} m_2 \dot{y}_{20}^2; \quad (3)$$

$$\Pi = \frac{1}{2} k_1 y_1^2 + \frac{1}{2} k_2 y_2^2 + \frac{1}{2} k_{10} y_{10}^2 + \frac{1}{2} k_{20} y_{20}^2. \quad (4)$$

Между системами координат y_1 , y_2 и y_0 , ϕ существуют следующие соотношения:

$$y_0 = ay_1 + by_2, \quad \phi = c(y_2 - y_1); \quad y_1 = y_0 - l_1 \phi, \quad y_2 = y_0 + l_2 \phi; \\ a = \frac{l_2}{l_1 + l_2}; \quad b = \frac{l_1}{l_1 + l_2}; \quad c = \frac{1}{l_1 + l_2}, \quad (5)$$

где l_1 и l_2 – расстояния центра масс до точек приложения сил Q_1 и Q_2 .

После ряда преобразований система уравнений движения может быть записана

$$\ddot{y}_1 (Ma^2 + Jc^2 + m_1 i_1^2) + y_1 (k_1 + k_{10} i_1^2) + \ddot{y}_2 (Mab - Jc^2) = Q_1; \quad (6)$$

$$\ddot{y}_2 (Mb^2 + Jc^2 + m_2 i_2^2) + y_2 (k_2 + k_{20} i_2^2) + \ddot{y}_1 (Mab - Jc^2) = Q_2. \quad (7)$$

После преобразований Лапласа при нулевых начальных условиях [11] система уравнений (6), (7) может быть представлена в операторной форме:

$$\bar{y}_1 [(Ma^2 + Jc^2 + m_1 i_1^2) p^2 + k_1 + k_{10} i_1^2] - \bar{y}_2 (Jc^2 - Mab) p^2 = \bar{Q}_1; \quad (8)$$

$$\bar{y}_2 [(Mb^2 + Jc^2 + m_2 i_2^2) p^2 + k_2 + k_{20} i_2^2] - \bar{y}_1 (Jc^2 - Mab) p^2 = \bar{Q}_2, \quad (9)$$

где $p = j\omega$ – комплексная переменная ($j = \sqrt{-1}$); значок $\langle - \rangle$ над переменной означает ее изображение по Лапласу.

Система уравнений (8), (9) в операторной форме в соответствии с [12, 13] может быть представлена в виде структурной математической модели, которая интерпретируется как структурная схема эквивалентной в динамическом отношении системы автоматического управления (рис. 2).

Как следует из структурной схемы, представленной на рис. 2, система состоит из двух парциальных блоков (или систем), имеющих инерционную межпарциальную связь, передаточная функция которой определяется выражением

$$W_{\text{пар}}(p) = (Jc^2 - Mab) p^2. \quad (10)$$

При определенных значениях коэффициентов a и b межпарциальная связь может обнуляться. В этом случае колебательные процессы в своих движениях становятся автономными. Однако для обеспечения работы технологического оборудования такие режимы не являются рациональными. Возможности изменения знака для передаточной функции в выражении



(10) рассмотрены в работе [14]. Парциальные частоты системы зависят от параметров рычажных связей (см. рис. 1) и определяются выражениями:

$$n_1^2 = \frac{k_1 + k_{10}i_1^2}{Ma^2 + Jc^2 + m_1i_1^2}; \quad (11)$$

$$n_2^2 = \frac{k_2 + k_{20}i_2^2}{Mb^2 + Jc^2 + m_2i_2^2}. \quad (12)$$

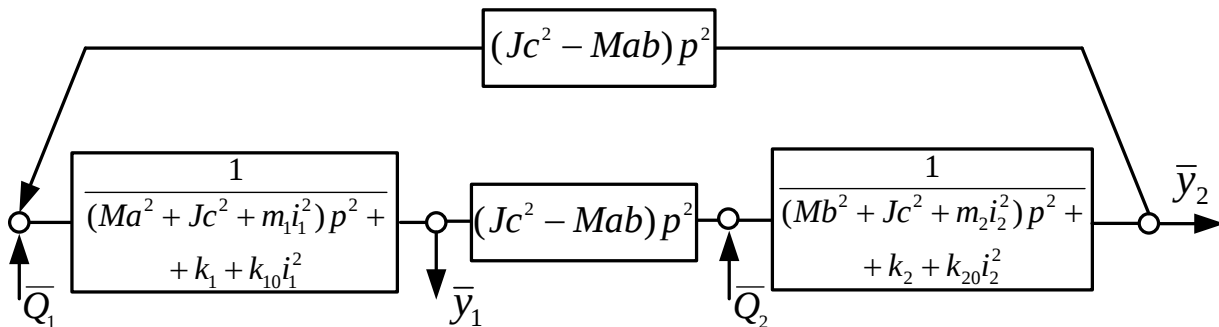


Рис. 2. Структурная математическая модель (структурная схема) механической колебательной системы, приведенной на рис. 1
Fig. 2. Structural mathematical model (structural scheme) of a mechanical oscillatory system presented by Fig. 1

Внешние воздействия $\bar{Q}_1$ и $\bar{Q}_2$, создаваемые инерционными возбудителями, могут изменяться в достаточно широких пределах, в том числе и в отношении фазовых сдвигов и соотношения амплитуд колебаний. В данном случае предполагается, что в системе могут выполняться условия

$$\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 = \bar{Q}. \quad (13)$$

Задача исследования заключается в разработке метода формирования структуры вибрационного поля рабочего органа как некоторой системы распределения амплитуд колебаний, обеспечивающих условия однородности форм движения (например, через обнуление угловых движений или выполнение определенных соотношений между координатами в условиях независимости или малой зависимости от частоты внешних сил).

Особенности динамических свойств системы межпарциальных связей

Используя структурную схему системы (см. рис. 2), найдем передаточные функции:

$$W_1(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_1} = \frac{(Mb^2 + Jc^2 + m_2i_2^2)p^2 + k_2 + k_{20}i_2^2}{A(p)}; \quad (14)$$

$$W_2(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_1} = \frac{(Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}; \quad (15)$$



$$W'_{\bar{Q}_1=0}(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}_2} = \frac{(Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}; \quad (16)$$

$$W'_{\bar{Q}_1=0}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}_2} = \frac{(Ma^2 + Jc^2 + m_1 i_1^2)p^2 + k_1 + k_{10} i_1^2}{A(p)}; \quad (17)$$

$$W''_{\bar{Q}_1=\bar{Q}_2=\bar{Q}}(p) = \frac{\bar{y}_1}{\bar{Q}} = \frac{(Mb^2 + Jc^2 + m_2 i_2^2)p^2 + k_2 + k_{20} i_2^2 + (Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}; \quad (18)$$

$$W''_{\bar{Q}_1=\bar{Q}_2=\bar{Q}}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{Q}} = \frac{(Ma^2 + Jc^2 + m_1 i_1^2)p^2 + k_1 + k_{10} i_1^2 + (Jc^2 - Mab)p^2}{A(p)}, \quad (19)$$

где

$$A(p) = [(Ma^2 + Jc^2 + m_1 i_1^2)p^2 + k_1 + k_{10} i_1^2] \cdot [(Mb^2 + Jc^2 + m_2 i_2^2)p^2 + k_2 + k_{20} i_2^2] - [(Jc^2 - Mab)p^2]^2 \quad (20)$$

– частотное характеристическое уравнение системы.

Для оценки динамических свойств механической колебательной системы при одновременном действии двух силовых факторов $\bar{Q}_1 = \bar{Q}_2 = \bar{Q}$ может быть использовано понятие передаточной функции межпарциальных связей, что в определенной степени отображает так называемые рычажные связи [15, 16].

При использовании выражений (18), (19) передаточная функция межпарциальной связи принимает вид

$$W_{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{(Ma^2 + Jc^2 + m_1 i_1^2)p^2 + k_1 + k_{10} i_1^2 + (Jc^2 - Mab)p^2}{(Mb^2 + Jc^2 + m_2 i_2^2)p^2 + k_2 + k_{20} i_2^2 + (Jc^2 - Mab)p^2}. \quad (21)$$

Если числитель и знаменатель формулы (21) будут равны друг другу, то $W_{12}(p) = 1$, что определяет такую форму движения вибростенда, когда реализуются только поступательные вертикальные колебания твердого тела, а угловые колебания обнуляются. Такие режимы представляют интерес для реализации определенных вибрационных технологических процессов (например, вибрационное упрочнение деталей) [3].

Из выражения (21) следует также, что числитель может принимать «нулевые» значения при частоте

$$\omega_1^2 = \frac{k_1 + k_{10} i_1^2}{Ma(a - b) + 2Jc^2 + m_1 i_1^2}. \quad (22)$$

В свою очередь знаменатель (21) также может принимать нулевые значения на частоте

$$\omega_2^2 = \frac{k_2 + k_{20} i_2^2}{Mb(b - a) + 2Jc^2 + m_2 i_2^2}. \quad (23)$$

Можно отметить, что при $p \rightarrow 0$ и $p \rightarrow \infty$ выражение (21) имеет пределы:



$$R_1 = \frac{k_1 + k_{10}i_1^2}{k_2 + k_{20}i_2^2}; \quad (24)$$

$$R_2 = \frac{Ma(a-b) + 2Jc^2 + m_1i_1^2}{Mb(b-a) + 2Jc^2 + m_2i_2^2}. \quad (25)$$

Амплитудно-частотные характеристики межпарциальных связей, определяемые на основе выражения (21), в общем виде приведены на рис. 3.

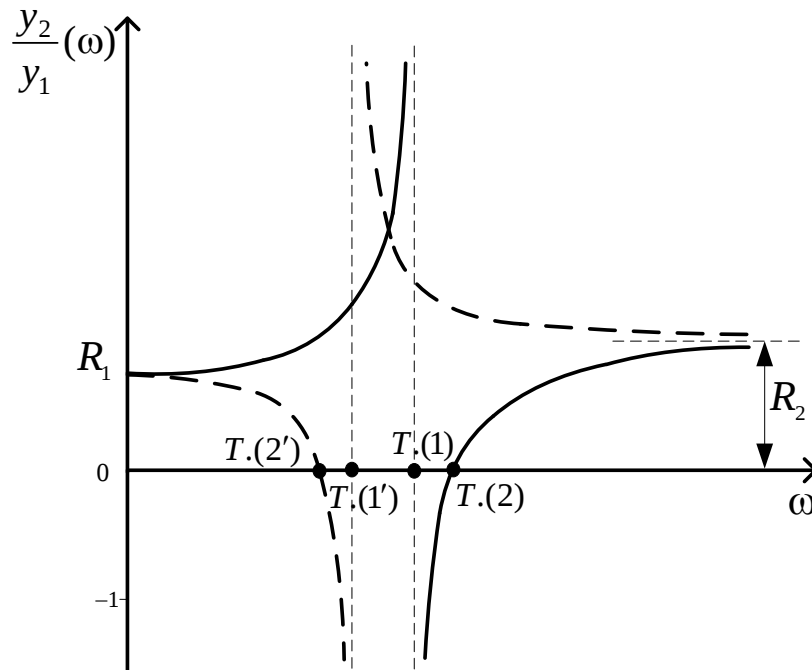


Рис. 3. Общий вид амплитудно-частотных характеристик межпарциальных связей
Fig. 3. General view of the amplitude-frequency characteristics of inter-partial ties

Для графика на частоте, определяемой точкой (1) (сплошная линия), имеется разрыв второго рода, что соответствует обнулению знаменателя выражения (21). При частоте, определяемой точкой (2) на оси абсцисс, то выражение (21) обнуляется. При $\omega \rightarrow 0$ и $\omega \rightarrow \infty$ графики отражают наличие предельных значений, которые могут быть найдены из выражений (24), (25).

Работа с вибрационными полями, подобными приведенным на рис. 3, не всегда является рациональной, поскольку изменения параметров системы могут приводить к существенным изменениям условий реализации технологических процессов.

Определение критических соотношений

Если в выражении (21) принять, что $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$, то это дает возможность записать следующие условия:

$$(Ma^2 + Jc^2 + m_1i_1^2)p^2 + k_1 + k_{10}i_1^2 = (Mb^2 + Jc^2 + m_2i_2^2)p^2 + k_2 + k_{20}i_2^2. \quad (26)$$



Откуда следует, что

$$p^2[M(a^2 - b^2) + m_1 i_1^2 - m_2 i_2^2] + k_1 - k_2 + k_{10} i_1^2 - k_{20} i_2^2 = 0. \quad (27)$$

Выражение (27) преобразуется к виду

$$p^2[M(a - b) + m_1 i_1^2 - m_2 i_2^2] + k_1 - k_2 + k_{10} i_1^2 - k_{20} i_2^2 = 0. \quad (27)$$

Условие реализации только поступательного движения можно найти, полагая, что

$$i_2^2 = \frac{M(a - b) + m_1 i_1^2}{m_2}; \quad (28)$$

$$i_2^2 = \frac{k_1 - k_2 + k_{10} i_1^2}{k_{20}}. \quad (29)$$

Таким образом

$$\frac{M(a - b) + m_1 i_1^2}{m_2} = \frac{k_1 - k_2 + k_{10} i_1^2}{k_{20}}, \quad (30)$$

откуда следует, что

$$i_1^2 = \frac{k_{20} M(a - b) - m_2 (k_1 - k_2)}{m_2 k_{10} - m_1 k_{20}}. \quad (31)$$

Зная i_1^2 , можно найти $i_2^2 = \frac{M(a - b) + m_1 i_1^2}{m_2}$.

Выбор параметров при выполнении условий (30), (31) обеспечивает выполнение движений при соблюдении соотношения $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$.

Для детализации представлений об особенностях амплитудно-частотных характеристик решается модельная задача при параметрах: $a = 0,4$; $b = 0,6$; $c = 1$; $M = 1000$ кг; $J = 400$ кг·м²; $m_1 = 120$ кг; $m_2 = 80$ кг; $k_1 = 900$ Н/м; $k_2 = 1100$ Н/м; $k_{10} = k_{20} = 500$ Н/м. С данными параметрами можно получить $i_1 = -2,05$, $i_2 = -1,95$. Амплитудно-частотные характеристики межпарциальных связей приведены на рис. 4, 5. Показано, что, изменяя значения передаточных отношений рычажных механизмов, можно существенным образом менять вид амплитудно-частотных характеристик, которые при определенных значениях i_1 и i_2 превращаются в специфичную амплитудно-частотную характеристику однородного вибрационного поля. Для получения такой структуры вибрационного поля необходима соответствующая настройка вибрационной технологической машины.

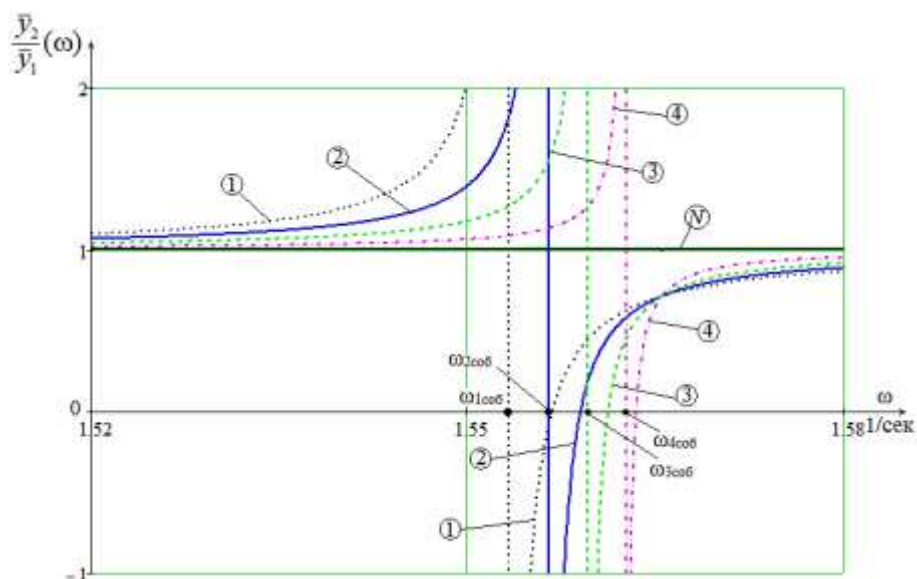


Рис. 4. Семейство амплитудно-частотных характеристик межпарциальных связей.
Графики построены соответственно: (1) – при $i_1 = -2,01$, $i_2 = -1,91$; (2) – при $i_1 = -2,02$, $i_2 = -1,92$;
(3) – при $i_1 = -2,03$, $i_2 = -1,93$; (4) – при $i_1 = -2,04$, $i_2 = -1,94$.
Графики (N) со значениями $i_1 = -2,05$, $i_2 = -1,95$
соответствуют режиму работы при соотношении $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$

Fig. 4. A family of amplitude-frequency characteristics of inter-partial ties: the graphs are plotted for (1)
 $i_1 = -2.01$, $i_2 = -1.91$; (2) $i_1 = -2.02$, $i_2 = -1.92$; (3) $i_1 = -2.03$, $i_2 = -1.93$; (4) $i_1 = -2.04$, $i_2 = -1.94$.
Graph (N) with the values of $i_1 = -2.05$, $i_2 = -1.95$ correspond to the operation mode when $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$

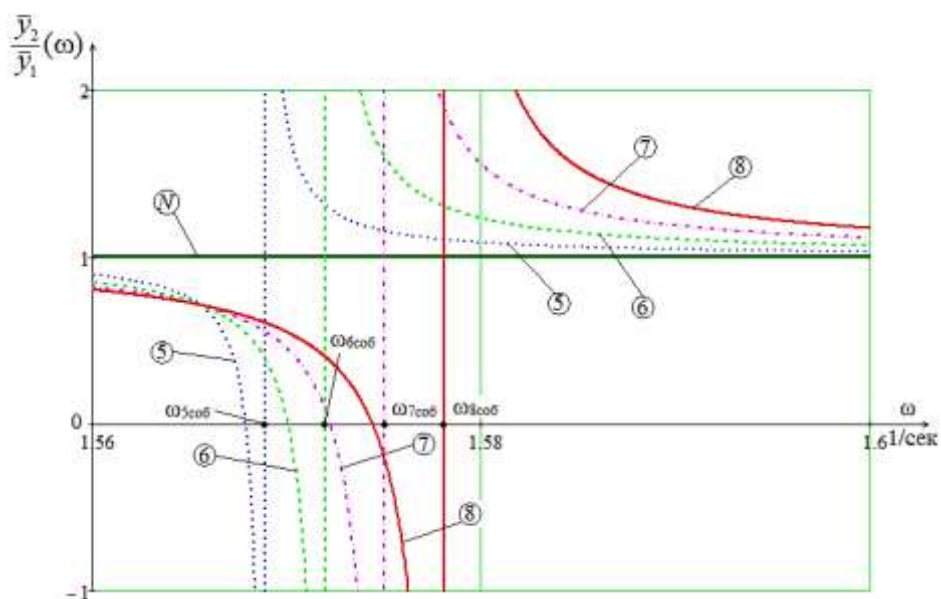


Рис. 5. Семейство амплитудно-частотных характеристик межпарциальных связей:
графики построены соответственно: (5) – при $i_1 = -2,06$, $i_2 = -1,96$; (6) – при $i_1 = -2,07$, $i_2 = -1,97$;
(7) – при $i_1 = -2,08$, $i_2 = -1,98$; (8) – при $i_1 = -2,09$, $i_2 = -1,99$.
Графики (N) со значениями $i_1 = -2,05$, $i_2 = -1,95$ соответствуют режиму работы
при соотношении $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$

Fig. 5. A family of amplitude-frequency characteristics of inter-partial ties: the graphs are plotted for (5)
 $i_1 = -2.06$, $i_2 = -1.96$; (6) $i_1 = -2.07$, $i_2 = -1.97$; (7) $i_1 = -2.08$, $i_2 = -1.98$; (8) $i_1 = -2.09$, $i_2 = -1.99$.
Graphs (N) with the values of $i_1 = -2.05$, $i_2 = -1.95$ correspond to the operation mode when $\frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = 1$



Возможности обеспечения необходимой структуры вибрационного поля при одном устройстве для преобразования движения

Интересен также подход, когда принимается, что дает $m_1 = 0$ и $k_{10} = 0$:

$$W_{\bar{Q}_1=\bar{Q}_2=\bar{Q}}^{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 + (Jc^2 - Mab)p^2}{(Mb^2 + Jc^2 + m_2 i_2^2)p^2 + k_2 + k_{20} i_2^2 + (Jc^2 - Mab)p^2}; \quad (32)$$

$$(Ma^2 + Jc^2)p^2 + k_1 = (Mb^2 + Jc^2 + m_2 i_2^2)p^2 + k_2 + k_{20} i_2^2; \quad (33)$$

$$i_2^2 = \frac{M(a-b)}{m_2}; \quad (34)$$

$$i_2^2 = \frac{k_1 - k_2}{k_{20}}. \quad (35)$$

Если $m_2 = 0$ и $i_2 = 0$, то получим:

$$W_{\bar{Q}_1=\bar{Q}_2=\bar{Q}}^{12}(p) = \frac{\bar{y}_2}{\bar{y}_1} = \frac{(Ma^2 + Jc^2 + m_1 i_1^2)p^2 + k_1 + k_{10} i_1^2 + (Jc^2 - Mab)p^2}{(Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2 + (Jc^2 - Mab)p^2}; \quad (36)$$

$$(Ma^2 + Jc^2 + m_1 i_1^2)p^2 + k_1 + k_{10} i_1^2 = (Mb^2 + Jc^2)p^2 + k_2; \quad (37)$$

$$i_1^2 = \frac{M(b-a)}{m_1}; \quad (38)$$

$$i_1^2 = \frac{k_2 - k_1}{k_{10}}. \quad (39)$$

Из выражений (38), (39) можно определить необходимое соотношение массы m_1 и жесткости k_{10} , что может быть представлено выражением

$$\frac{m_1}{k_{10}} = \frac{M(b-a)}{k_2 - k_1} = \frac{1000 \cdot (0.6 - 0.4)}{1100 - 900} = 1. \quad (40)$$

Полагая, что данные для модельной задачи определяются значениями $a = 0,4$; $b = 0,6$; $c = 1$; $M = 1000$ кг; $J = 400$ кг.м²; $m_2 = 80$ кг; $k_1 = 900$ Н/м; $k_2 = 1100$ Н/м; $k_{10} = 500$ Н/м; $m_1 = 500$ кг, построим амплитудно-частотные характеристики межпарциальных связей (рис. 6, 7).

Из графиков, представленных на рис. 6 и 7, следует, что при отсутствии одного из устройств для преобразования движения (в частности $m_2 = 0$) также возможна настройка вибрационного поля на однородную структуру $\frac{y_2}{y_1} = 1$. На рис. 6 и 7 также показаны возможные

вариации форм амплитудно-частотных характеристик при изменениях передаточных отношений i_1 и i_2 рычажных механизмов. Показано, что близкие к однородным вибрационным полям



результаты могут быть получены не только в критических соотношениях, распространяющихся на все частоты, но и в локальных частотных диапазонах, когда соотношения амплитуд будут достаточно близки к значению, равному единице.

На рис. 8 отображена ситуация вариативности амплитудно-частотных характеристик системы при различных сочетаниях i_1 и i_2 .

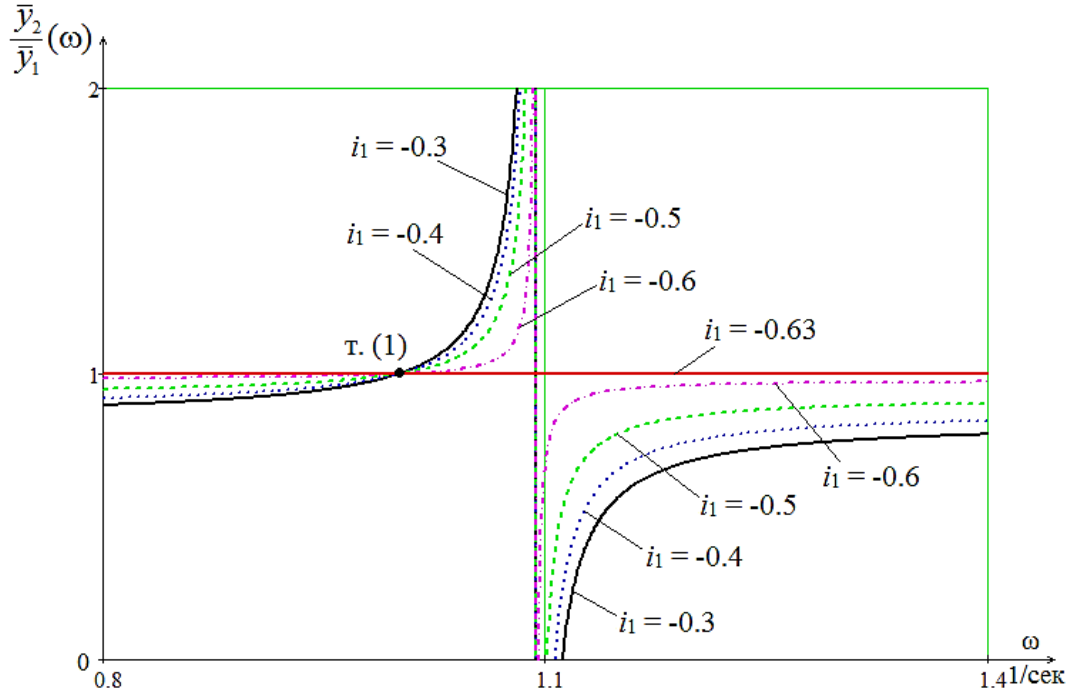


Рис. 6. Амплитудно-частотные характеристики межпарциальных связей при $m_2 = 0$ и $i_2 = 0$
Fig. 6. Amplitude-frequency characteristics of inter-partial ties when $m_2 = 0$ and $i_2 = 0$

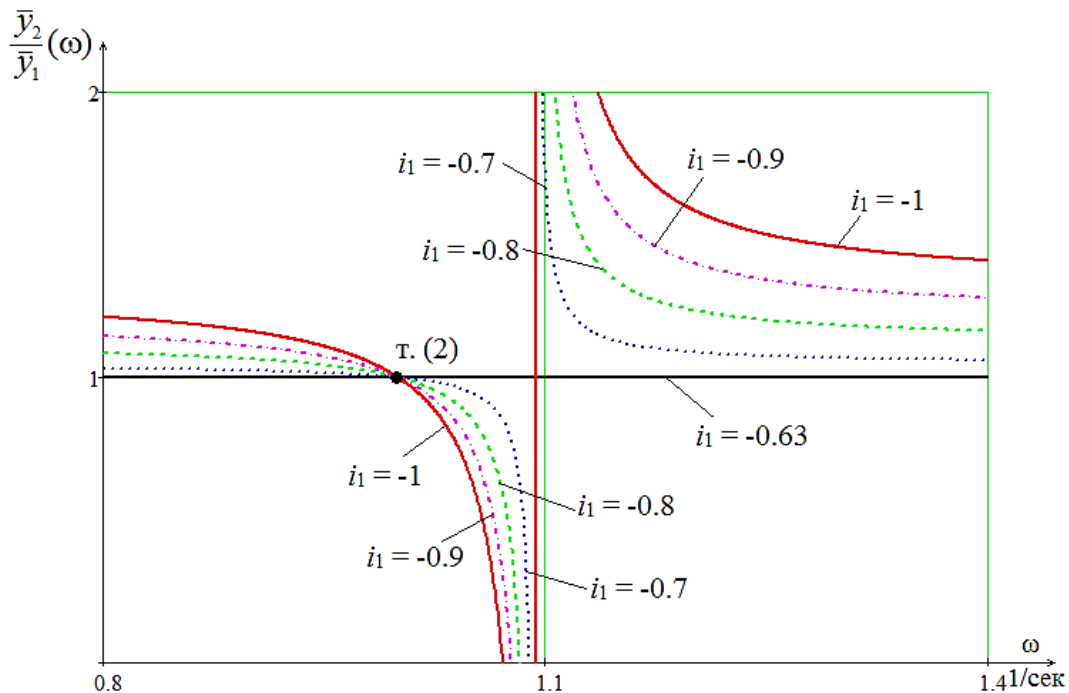


Рис. 7. Амплитудно-частотные характеристики межпарциальных связей при $m_2 = 0$ и $i_2 = 0$
Fig. 7. Amplitude-frequency characteristics of inter-partial ties when $m_2 = 0$ and $i_2 = 0$

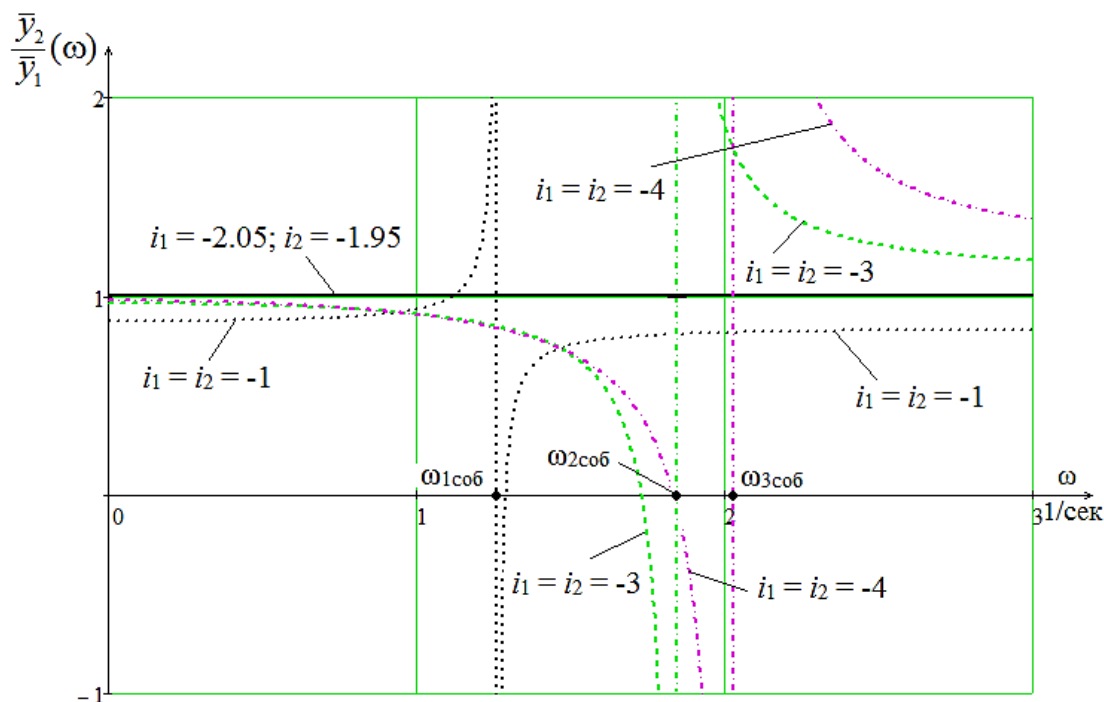


Рис. 8. Амплитудно-частотные характеристики межпарциальных связей при различных сочетаниях i_1 и i_2

Fig. 8. Amplitude-frequency characteristics of inter-partial ties under different combinations of i_1 and i_2

Таким образом, введение дополнительных связей в структуру механической колебательной системы вибростенда позволяет существенным образом влиять на структуру вибрационного стенда, предоставляя возможности выбора условий рациональной организации технологического процесса вибрационной обработки, например, вибрационного упрочнения, классификации, транспортирования и др.

Заключение

На основе проведенных исследований показано, что вибрационное поле вибрационной технологической машины формируется под действием нескольких факторов, которые определяются одновременно совместным действием нескольких силовых возмущений, несимметричностью инерционных и упругих свойств механической системы, наличием дополнительных связей и др.

Авторами предложен метод формирования структуры и параметров вибрационного поля технологической машины на основе введения дополнительных связей, реализуемых рычажными механизмами. Разработана технология построения математических моделей для оценки возможностей корректировки и настройки вибрационных полей путем выбора параметров дополнительных связей. Показано, что использование передаточных функций парциальных связей дает возможность получения аналитических соотношений параметров системы, обеспечивающих необходимый режим работы стенда, в том числе и с возможностями реализации режима создания однородного поля, не зависящего от частоты силового возмущения, что требуется для многих технологических процессов, в частности, вибрационного упрочнения крупногабаритных изделий.

Показаны возможность использования метода и технологии его реализации для формирования структур вибрационных полей частного вида, когда определенные условия распределения амплитуд колебаний точек рабочего органа создаются в заданных частотных границах.



Библиографический список

1. Пановко Г.Я. Динамика вибрационных технологических процессов: монография. М.-Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», Институт компьютерных исследований, 2006. 176 с.
2. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения. Воронеж: Научная книга, 2011. 568 с.
3. Елисеев А.В., Сельвинский В.В., Елисеев С.В. Динамика вибрационных взаимодействий элементов технологических систем с учетом неудерживающих связей. Новосибирск: Наука, 2015. 332 с.
4. Быховский И.И. Основы теории вибрационной техники. М.: Машиностроение, 1969. 364 с.
5. Повидайло В.А., Силин Р.И., Щигель В.А. Вибрационные устройства в машиностроении. М.: Машгиз, 1962. 111 с.
6. Eliseev S.V., Eliseev A.V., Mironov A.S. Approaches to estimation of features of vibration fields at the interaction of working environment with working body of technological machines // Open Innovation: сб. ст. IV Междунар. науч.-техн. конф. (Пенза, 12 апреля 2018 г.). Пенза: МЦНС «Наука и просвещение», 2018. С. 50–61.
7. Елисеев С.В., Елисеев А.В., Миронов А.С. Возможности изменения вибрационного поля рабочих органов технологических машин // Journal of advanced research in technical science. 2018. № 9-1. С. 73–79.
8. Kuznetsov N.K., Lapshin V.L., Eliseev S.V. Some problems of control of dynamical conditions of technological vibrating machines // International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering (Saint-Petersburg, 23–24 March 2017). Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2017. P. 1136–1140.
9. Елисеев А.В., Кашуба В.Б., Миронов А.С. Динамика механической цепи при совместном внешнем возмущении по двум координатам // Аналитическая механика, устойчивость и управление: труды XI Международной Четаевской конференции (Казань, 13–17 июня 2017 г.). Казань: Изд-во КНИТУ-КАИ, 2017. С. 118–130.
10. Елисеев С.В., Артюнин А.И. Прикладная теория колебаний в задачах динамики линейных механических систем. Новосибирск: Наука, 2016. 459 с.
11. Елисеев С.В., Резник Ю.Н., Хоменко А.П., Засядко А.А. Динамический синтез в обобщенных задачах виброзащиты и виброизоляции технических объектов. Иркутск: Изд-во ИГУ, 2008. 523 с.
12. Елисеев А.В., Елисеев С.В., Борисов Б.Г. Устройство для преобразования движения в настройке вибростенда с инерционным возбудителем // Фундаментальные и прикладные научные исследования: сб. ст. Междунар. науч.-техн. конф. (Саранск, 03 апреля 2016 г.). Саранск: ООО «Омега Сайнс», 2016. С. 16–20.
13. Елисеев А.В., Кашуба В.Б., Кинаш Н.Ж., Елисеев С.В. Особенности динамических свойств рабочих органов технологических машин при инерционном возбуждении колебания // Вестник Донского государственного технического университета. 2016. Т. 16. № 4 (87). С. 63–71.
14. Елисеев А.В., Выюнг К.Ч. Некоторые возможности управления одномерным вибрационным полем технологической машины // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1 (49). С. 33–41.
15. Елисеев А.В., Ситов И.С., Нгуен Д.Х. Некоторые вопросы формирования структуры вибрационного поля вибростенда: особенности системы измерения, средства настройки // Системы. Методы. Технологии. 2016. № 2 (30). С. 17–26.
16. Елисеев А.В., Нгуен Д.Х., Выюнг К.Ч., Ситов И.С. Об учете особенностей распределения амплитуд колебания рабочего органа вибрационной технологической машины // Решетневские чтения: материалы XX Междунар. науч. конф. (Красноярск, 09–12 ноября 2016). В 2 т. Красноярск: Изд-во СибГАУ, 2016. Т. 1. С. 554–556.

References

1. Panovko G.Ya. *Dinamika vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov* [Dynamics of vibration technological processes]. Moscow-Izhevsk: SIC "Regular and chaotic dynamics", SIC "Regular and chaotic dynamics", Institute of Computer Research, Publ., 2006, 176 p. (In Russia)
2. Kopylov Yu.R. *Dinamika protsessov vibroudarnogo uprochneniya* [Dynamics of vibro-impulsive hardening processes]. Voronezh: Nauchnaya kniga Publ., 2011, 568 p. (In Russia)
3. Eliseev A.V., Sel'vinskii V.V., Eliseev S.V. *Dinamika vibratsionnykh vzaimodeistvii elementov tekhnologicheskikh sistem s uchetom neuderzhivayushchikh svyazei* [Dynamics of vibration interactions of technological system elements taking into account unilateral constraints]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2015, 332 p. (In Russia)
4. Bykhovskii I.I. *Osnovy teorii vibratsionnoi tekhniki* [Fundamentals of the theory of vibration engineering]. Moscow: Mashinostroenie, 1969, 364 p. (In Russia)
5. Povidailo V.A., Silin R.I., Shchigel' V.A. *Vibratsionnye ustroystva v mashinostroenii*. [Vibrating devices in mechanical engineering]. Moscow: Mashgiz Publ., 1962, 111 p. (In Russia)
6. Eliseev S.V., Eliseev A.V., Mironov A.S. Approaches to estimation of features of vibration fields at the interaction of working environment with working body of technological machines. *Sbornik stat'ei IV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Open Innovation"* [Collection of articles of IV International Scientific and Technical Conference "Open Innovation"]. Penza: International centre for scientific cooperation «Science and education» Publ., 2018, pp. 50–61.



7. Eliseev S.V., Eliseev A.V., Mironov A.S. Some possibilities of changing the vibratory field of technological machine working bodies. *Journal of advanced research in technical science*. 2018, no. 9-1, pp. 73–79.
8. Kuznetsov N.K., Lapshin V.L., Eliseev S.V. Some problems of control of dynamical conditions of technological vibrating machines. *International Conference on Innovations and Prospects of Development of Mining Machinery and Electrical Engineering* (Saint-Petersburg, 23–24 March 2017). Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing, 2017. P. 1136–1140.
9. Eliseev A.V., Kashuba V.B., Mironov A.S. *Dinamika mekhanicheskoi tsepi pri sovmestnom vneshnem vozmushchenii po dvum koordinatam* [Dynamics of a mechanical circuit under joint external perturbation by two coordinates]. *Trudy XI Mezhdunarodnoi Chetaevskoi konferentsii "Analiticheskaya mekhanika, ustoychivost' i upravlenie"* [Proceedings of 11th International Chetaev Conference "Analytical Mechanics, Stability and Control"]. Kazan': KNITU-KAI Publ., 2017, pp. 118–130. (In Russian)
10. Eliseev S.V., Artyunin A.I. *Prikladnaya teoriya kolebaniy v zadachakh dinamiki lineinykh mekhanicheskikh sistem* [Applied theory of oscillations in the problems of linear mechanical system dynamics]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2016, 459 p. (In Russian)
11. Eliseev S.V., Reznik Yu.N., Khomenko A.P., Zasyadko A.A. *Dinamicheskii sintez v obobshchennykh zadachakh vibrozashchity i vibroizolyatsii tekhnicheskikh ob"ektov* [Dynamic synthesis in the generalized problems of vibration protection and vibration insulation of technical objects]. Irkutsk: IGU Publ., 2008, 523 p. (In Russian)
12. Eliseev A.V., Eliseev S.V., Borisov B.G. *Ustroystvo dlya preobrazovaniya dvizheniya v nastroyke vibrostenda s inertionnym vozbuditелем* [Device for motion transformation in setting of the vibration table with an inertia exciter]. *Sbornik statei Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Fundamental'nye i prikladnye nauchnye issledovaniya"* [Collection of articles of the International Scientific and Technical Conference "Fundamental and Applied Scientific Research"]. Saransk: OOO «Omega Sains» Publ., 2016, pp. 16–20. (In Russian)
13. Eliseev A.V., Kashuba V.B., Kinash N.Zh., Eliseev S.V. Features of the dynamic properties of the working bodies of technological machines with inertial excitation of vibrations. *Vestnik Donskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Vestnik of Don State Technical University]. 2016, vol. 16, no. 4 (87), pp. 63–71. (In Russian)
14. Eliseev A.V., Vyong K.Ch. The certain one dimensional vibratory field of technological machine control capabilities. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling]. 2016, no. 1 (49), pp. 33–41. (In Russian)
15. Eliseev A.V., Sitov I.S., Nguen D.Kh. Some points of structure formation of a vibration field of a shaker unit: measurement and configuration. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods. Technologies]. 2016, no. 2 (30), pp. 17–26. (In Russian)
16. Eliseev A.V., Nguen D.Kh., Vyong K.Ch., Sitov I.S. *Ob uchete osobennostei raspredeleniya amplitud kolebaniya rabocheho organa vibratsionnoi tekhnologicheskoi mashiny* [About the specific features of oscillation amplitude distribution of the working body vibration of technological machine]. *Materialy XX Mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii "Reshetnevskie chteniya"* [Materials of the XX International Scientific Conference "Reshetnev's readings"]. In 2 volumes. Krasnoyarsk: SibGAU Publ., 2016, vol. 1, pp. 554–556. (In Russian)

Критерии авторства

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

Authorship criteria

Eliseev S.V., Kuznetsov N.K., Vuong K.Ch. 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 681.6

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-42-49>

АНАЛИЗ ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

© П.А. Лонцих¹, Е.П. Кунаков², Е.И. Коршунова³, И.В. Ковригина⁴

^{1,2,3}Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

⁴Забайкальский институт железнодорожного транспорта ИрГУПС,
672040, Российская Федерация, г. Чита, ул. Магистральная, 11.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Проанализировать повышение качества продукции машиностроительной отрасли за счет применения цифровых технологий на примере технологического процесса гибки труб. **МЕТОДЫ.** Проведен анализ литературных источников, исследовательских работ. Проведен анализ технологий гибки труб. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Предложен метод улучшения технологического процесса гибки труб за счет использования цифровых технологий – комплекса, состоящего из трубогибочного станка с ЧПУ и 3D-сканера. Благодаря данному методу удалось сократить время технологического процесса в среднем в 16 раз, уменьшить длину заготовки, снизить процент брака технологического процесса гибки труб. **ВЫВОДЫ.** Разработка и внедрение новых производственных технологий является важной задачей для машиностроения. При использовании цифровых технологий существенно повышается эффективность производственных процессов и сокращаются затраты на процедуры обработки информации, необходимой при производстве продукции машиностроительного предприятия.

Ключевые слова: технология машиностроения, машиностроение, повышение качества, постоянное улучшение.

Информация о статье. Дата поступления 14 августа 2018 г.; дата принятия к печати 04 сентября 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Лонцих П.А., Кунаков Е.П., Коршунова Е.И., Ковригина И.В. Анализ цифровых технологий, применяемых в машиностроительной отрасли // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 42–49. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-42-49

ANALYSIS OF DIGITAL TECHNOLOGIES USED IN MECHANICAL ENGINEERING

P.A. Lontsikh¹, E.P. Kunakov², E.I. Korshunova³, I.V. Kovrigina⁴

^{1,2,3}Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

⁴Transbaikalian Railway Transport Institute of Irkutsk State Transport University,
11, Magistralnaya St., Chita, 672040, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to analyze machine-building industry product quality improvement through the use of digital technologies on example of the technological process of pipe bending. **METHODS.** The literary sources and research works are reviewed. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Having analyzed pipe bending technologies a method for improving the technological process of pipe bending was proposed using digital technologies including a complex of a CNC pipe

¹Лонцих Павел Абрамович, доктор технических наук, профессор кафедры управления промышленными предприятиями, e-mail: palon@list.ru

Pavel A. Lontsikh, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Industrial Enterprise Management, e-mail: palon@list.ru

²Кунаков Егор Петрович, аспирант, e-mail: egor-kunakov@mail.ru

Egor P. Kunakov, Postgraduate, e-mail: egor-kunakov@mail.ru

³Коршунова Елена Игоревна, магистрант, e-mail: okei.81@mail.ru

Elena I. Korshunova, Master's degree student, e-mail: okei.81@mail.ru

⁴Ковригина Инна Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры подвижного состава железных дорог, e-mail: innabella@mail.ru

Inna V. Kovrigina, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Railroad Rolling Stock, innabella@mail.ru



bender and a 3D scanner. The application of this method allows to reduce the technological process duration by an average of 16 times, shorten the workpiece length, decrease the reject rate of the technological process of bending pipes. **CONCLUSIONS.** Development and implementation of new production technologies are important tasks for mechanical engineering. The use of digital technologies enables significant increase in the efficiency of production processes and considerable reduction of the costs of information processing required under the manufacturing of engineering enterprise products.

Keywords: *technology of mechanical engineering, mechanical engineering, improvement of quality, continuous improvement*

Information about the article. Received August 14, 2018; accepted for publication September 4, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Lontsikh P.A., Kunakov E.P., Korshunova E.I., Kovrigina I.V. Analysis of digital technologies used in mechanical engineering. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 42–49. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-42-49 (In Russian)

Введение

Машиностроение характеризуется как высоко конкурентная отрасль, в которой ключевым фактором успеха является эффективность применения новых инновационных технологий и методов организации контроля качества изделия на всех этапах его жизненного цикла. Предприятия получают конкурентные преимущества за счет внедрения данных технологий и методов, которые повышают производительность производственных процессов и улучшают качество выпускаемой продукции.

На сегодняшний день машиностроение представляет собой единую интегрированную систему высокотехнологичного производства и современной технологии проектирования. Производственные процессы предприятий данной отрасли являются чрезвычайно сложными и насыщенными информационными потоками.

Автоматизированные или автоматические производственные линии являются неотъемлемым атрибутом современного машиностроительного производства. Работа оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ), а также программируемых промышленных роботов позволяет значительно увеличить производительность, исключить вероятность влияния человеческого фактора и улучшить качество продукции. Наличие программируемого оборудования в несколько раз увеличивает эффективность производства и значительно сокращает издержки.

При переходе к автоматизированному производству ключевую роль играет инфор-

мация, определяющая технологический процесс. Информационные технологии дают существенные преимущества в работе предприятий машиностроения. При использовании современных информационных технологий существенно повышается эффективность производственных процессов и сокращаются затраты на процедуры обработки информации, необходимой при производстве продукции машиностроительного предприятия. При помощи информационных технологий возможно решение проблем сбора, хранения, обработки информации обо всех основных характеристиках изделий, испытаниях изделий, эксплуатации продукции на протяжении всего жизненного цикла вплоть до утилизации.

Изучению вопросов использования цифровых технологий в машиностроительном производстве посвящены исследования таких отечественных ученых, как Д.М. Антипов, А.В. Петров, А.В. Козлов, А.А. Кутин, Дорофеев К.В. и др. В их работах рассматривались проблемы улучшения технологических процессов машиностроительной отрасли за счет применения цифровых технологий, в том числе технологического процесса гибки труб. В частности, Д.М. Антипов рассматривал возможность подходов к повышению производительности и улучшения качества производственных процессов предприятий машиностроения и особенностей их применения [1]. В работе А.В. Петрова представлены новые технологии гибки труб, в том числе использование трубогибов с ЧПУ [2]. Работа А.В. Козлова посвящена вопросам



компьютерного моделирования процесса холодной гибки труб с раскатыванием и экспериментальным исследованием распределения напряжений [3]. А.А. Кутин обсуждает вопросы модернизации отечественного высокотехнологичного машиностроения на основе методов моделирования и прогнозирования развития цифровых производств [4]. В работе [5] проанализированы технологии высокотехнологичного компьютерного инжиниринга и используемых инструментов.

В то же время в известных работах не получили достаточного отражения вопросы комплексного применения цифровых технологий на основе интегрирования технологических процессов изготовления изделий с процессами их проектирования, технологической подготовки производства, контроля. Решению некоторых из этих вопросов, на примере управления качеством технологического процесса изготовления труб и посвящена настоящая статья.

Результаты исследования и их обсуждение

При комплексном использовании современных информационных технологий возможно не только существенно повысить эффективность производственных процессов и сократить затраты на процедуры обработки информации, необходимой при производстве продукции машиностроительного предприятия, но и существенным образом повысить ее качество.

Показатели качества продукции, согласно ГОСТ 15467-79, можно разделить на группы:

- показатели, определяющие технический уровень;
- эксплуатационные показатели;
- производственно-технологические показатели.

К показателям, определяющим технический уровень, относят мощность, точность работы и производительность, КПД, удельный расход горюче-смазочных материалов, степень механизации и автоматизации, экономичность, экологичность и т.д. Важнейшим эксплуатационным показателем качества изделия является надежность. Надежность – это свойство изделия выполнять заданные функции, сохраняя свои эксплуатационные показатели в определенных пределах в течение требуемого промежутка времени или наработки. Надежность машин во многом определяется прочностью и жесткостью их конструк-

ций: рациональной расстановкой опор, приданием конструкциям жестких форм и т.п.

Качество и надежность изделий непосредственно зависят от точности их изготовления. Под точностью в технологии машиностроения понимают степень соответствия производимых изделий их заранее установленным эталонам или образцам. Точность – понятие комплексное, характеризующее не только геометрические параметры изделий и их элементов, но и единообразие различных свойств: упругих, динамических, электрических и т.д. Одним из основных показателей, определяющих точность машины, является точность относительных движений рабочих органов, т.е. максимальное приближение действительного характера движения исполнительных поверхностей к теоретическому закону движения, выбранному исходя из служебного назначения изделия.

Производственно-технические показатели, или показатели технологичности конструкции, устанавливают эффективность конструктивных решений с точки зрения обеспечения оптимальных затрат труда и средств на изготовление изделия, его эксплуатацию, техническое обслуживание и ремонт⁴.

Виды контроля классифицируют в зависимости от назначения, способов про-

⁴ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения; введен с 01.07. 1979 г. (взамен ГОСТ 15467-70) / GOST 15467-79. Product quality management. Basic concepts. Terms and Definitions; introduced from 01 July 1979 (in replacement of GOST 15467-70)



ведения, контролируемых параметров и других признаков. При входном контроле проверяются основные параметры сырья, исходных материалов, качество заготовок, полуфабрикатов и поставляемых изделий. Эффективность мер по входному контролю непосредственно зависит от масштаба данных мер. Целью входного контроля является обеспечение степени контроля материалов (полупродуктов, заготовок и т.п.), поступающих на предприятие, которые требуются для надлежащего использования в производстве. Объем процедур контроля зависит от типа материала и меняется в зависимости от технологического процесса. При пооперационном контроле в ходе технологического процесса проверяются параметры, свойства и соответствие полупродукта, заготовки, сборочных единиц и изделий требованиям. Данный вид контроля считается наиболее критичным в изготовлении качественной продукции. Он обеспечивает правильный подход персонала производственного цеха к вопросам качества.

При изготовлении технически сложных изделий не всегда можно проводить полную сборку на предприятии. Для контрольной проверки собираемости сопрягаемых деталей в этих случаях рекомендуется составлять эскизы деталей с указанием в них фактических наиболее ответственных размеров, полученных при механической обработке. Сравнивая сопрягаемые размеры деталей и принимая необходимые меры, можно предупредить возникновение больших пригоночных работ при монтаже машины.

Для простых деталей применяется окончательный контроль, при котором проверяются все параметры. Для сложных или крупных деталей, особенно тех, проверка которых производится на станке, обязателен пооперационный контроль с целью своевременного выявления отклонений или брака деталей.

Изготовление любого вида и типа изделия во всех отраслях машиностроительного производства от момента получения заготовок, полуфабрикатов, материа-

лов, комплектующих и до момента отправки его заказчику сопровождается контрольными операциями.

К контролируемым параметрам относятся:

- физические, химические, механические свойства и химический состав исходных материалов;
- структура и внутренние дефекты материала изделий, контроль осуществляется в ходе технологического процесса и в готовых изделиях;
- геометрические параметры и дефекты поверхности деталей на стадии изготовления и в готовом изделии;
- динамические характеристики и техническое состояние деталей, узлов и конструкций в процессе изготовления и эксплуатации;
- технические параметры и свойства готовых изделий в процессе приемки, испытаний и эксплуатации [6, 7].

Внедрение интегрированных информационных систем при организации производства позволит оптимизировать и усовершенствовать производственные процессы и процессы контроля сложных изделий, к которым можно отнести технологический процесс изготовления трубопроводов.

При создании трубопроводов или опорных конструкций часто возникает необходимость организации поворотных частей без снижения качества монтажа и повышения риска создания аварийных участков. Прочностные качества отрезка, скрепленного фитингами, будет отличаться в худшую сторону от свойств монолитной трубы. Для создания сгибов применяется технология обработки труб, которая в промышленных условиях осуществляется при помощи специального оборудования – автоматических трубогибов.

С использованием автоматических станков с числовым программным управлением (ЧПУ) гибка труб стала более точной и менее затратной. Современные автоматические станки с ЧПУ имеют весомое преимущество – это точность гибки, вплоть до десятых частей градуса угла, а также



снижение процента бракованных изделий. Процесс гибки труб на станках с ЧПУ может осуществляться несколькими методами, которые описаны, например, в работах ⁵⁻⁷ [8]. Наиболее распространены станки, работа на которых осуществляется способом наматывания. Обычно такое оборудование оснащено дорнами. Принцип действия трубогиба, работающего способом наматывания, состоит в том, что труба, одетая на дорн трубогибного станка, зажимом прижимается к ручью гибочного ролика, который, поворачиваясь вокруг оси вместе с зажимом, тянет за собой трубу, наматывая ее на гибочный ролик по радиусу ручья гибочного ролика до требуемого углагиба. При этом точкой опоры для изгиба труб служит вставка скользящего башмака, а дорн, находящийся внутри трубы, не позволяет трубе изменять первоначальное сечение (форму) трубы. Намотка происходит до тех пор, пока не будет достигнут требуемый угол сгибания. Дорновая гибка пришла на смену гибки труб с наполнителем, где в качестве наполнителя использовались различные материалы, например, песок. Именно наличие дорна и возможность контроля его положения и отражает основной принцип дорновой гибки. Дорновая гибка, в отличие от всех других технологий, может обеспечить гибку по малым радиусам при отсутствии явных дефектов в виде овальности или гофра.

Бездорновый трубогиб с ЧПУ обычно работает по системе обкатки трубы. Изделие монтируется между двумя роликами, один из которых обкаточный, другой – неподвижный. Обкаточный ролик перемещается вокруг неподвижного, вследствие чего труба прижимается к нему плотнее. Благодаря этому изделие получает заданную

форму, определяемую радиусом неподвижного ролика. На бездорновых трубогибах чаще всего производится работа с трубами, имеющими достаточно толстые стенки.

Трубогибы и трубогибные станки, работающие способом наматывания, наиболее часто используются для гибки труб в авиационной и космической промышленности, автомобилестроении, тракторостроении и других сферах машиностроения. Такие трубогибы позволяют получить качественные гибы трубы при небольших радиусах и обеспечивают высокую и абсолютную повторяемость геометрии деталей при изготовлении деталей с пространственной гибкой.

Принцип гибки труб способом обкатки заключается в прижатии трубы к ручью неподвижного гибочного ролика обкаточным роликом. Ручьи обкаточного и неподвижного роликов трубогиба должны соответствовать типоразмеру изгибаемой трубы. Фиксация (закрепление) трубы на трубогибном станке происходит вне зоны движения обкаточного ролика. Способом обкатки, как правило, гнутся толстостенные трубы, при этом изменение сечения формы (овальность) трубы в местегиба может составлять значительные величины. Для достижения заданного значения овальности трубы в местегибы требуется дополнительное устройство, позволяющее регулировать зазор между неподвижным и обкаточным роликами трубогиба. Поэтому этот способ наиболее применим в тех случаях, когда к изготовленным трубным деталям не предъявляются жесткие требования по овальности, сохранению геометрии и пространственных параметров.

Трехроликовая гибка применяется

⁵Технический контроль в машиностроении. Справочник проектировщика. М.: Машиностроение, 1987. 512 с. / Technical control in mechanical engineering. Designer's Handbook. Moscow: Mashinostroenie, 1987. 512 p.

⁶Технология конструкционных материалов: учебник для вузов / под ред. Ю.М. Барюнова. СПб.: Питер, 2015. 512 с. / Technology of construction materials: a textbook for universities / under edition of Yu.M. Baryunov. St. Petersburg: Piter, 2015. 512 p.

⁷Овчинников И.Н., Овчинников Е.И. Судовые системы и трубопроводы (устройство, изготовление и монтаж): учебник. 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Судостроение, 1983. 344 с. / Ovchinnikov I.N., Ovchinnikov E.I. Ship systems and pipelines (design, manufacturing and installation): textbook. 3rd edition, revised and enlarged. Leningrad: Shipbuilding, 1983. 344 p.



на станках для гибки труб и профилей. В этом случае труба базируется на двух роликах, а с помощью третьего ролика осуществляется давление. При этом труба подается в сторону, то есть давление не одновременное, а постоянное по площадигиба. Такой метод используется для гибки больших радиусов. Преимуществом данного вида гибки является отсутствие специализированной оснастки под радиусгиба: в трехроликовых станках радиус формируется положением ролика и один и тот же инструмент используется для создания нескольких радиусов^{5,6} [8–10].

Большой объем информации по каждому отдельно взятому изделию усложняет процесс ее обработки. При проектировании, технологической подготовке, испытаниях и проверках изделий используется более 120 документов: габаритные чертежи комплектующих, технические условия на комплектующие, технические описания, методики контроля, программы испытаний, руководства по эксплуатации и др. Все эти документы хранятся на бумажных носителях в архивах и требуют времени для их поиска. Во время работы со станками с ЧПУ бумажных документов в разы меньше, однако, отказаться полностью от их использования пока не представляется возможным.

При этом цифровые технологии можно реализовать в виде комплекта технологически и программно связанного между собой современного оборудования, который позволяет при помощи технологий, основанных на 3D-моделировании, в максимально автоматизированном режиме изготавливать трубопроводы начиная от заготовок и комплектующих изделий на входе до готового продукта на выходе.

К преимуществам цифровых технологий гибки труб, по сравнению с технологиями ручной гибки, можно отнести следующее:

- снижение трудоемкости изготовления;
- высокая производительность;
- обеспечение качества и повторяемости трубопроводов;

- создание электронной базы эталонных моделей трубопроводов;
- активный контроль изготавливаемого трубопровода путем сравнения с электронно-цифровой моделью.

Данный подход был реализован на предприятиях машиностроения и авиационных технологий г. Иркутска и Улан-Удэ, где был внедрен автоматизированный производственный комплекс, состоящий из трубогибочного станка с ЧПУ и 3D-сканера.

Для контроля отклонений геометрии поверхностей детали сначала проводится 3D-сканирование поверхности изделия. Затем данные сканирования сопоставляются с исходной CAD-моделью, по которой была изготовлена деталь. Отклонения по всей поверхности отображаются разным цветом в виде цветовой карты. Для исправления выявленных дефектов программа сканера автоматически вносит поправки и передает их в систему управления трубогибочного станка для исправления детали.

Кроме того, данный сканер может быть использован при отсутствии конструкторской документации, когда необходимо масштабирование или изменение геометрии детали. Эта процедура позволяет получить редактируемую CAD-модель на основе сканирования. 3D-сканирование дает исходные данные в виде облака точек (Point Cloud). Этот набор данных содержит точки, снятые с поверхности детали и описанные тремя координатами. Облако точек почти не используется для дальнейшей работы и сразу преобразуется в полигональную сетку, применяя которую, конструктор создает твердотельную CAD-модель. Полученную модель можно редактировать или использовать как исходную для проектирования других деталей [2, 3, 11–13].

Таким образом, появляется возможность не только компьютерного моделирования процесса гибки, но и выполнения анализа напряженно-деформированного состояния и оценки напряжений и деформаций, имеющих место в стенках изгибаемой трубы в очаге деформации и за его пределами.

В таблице приведены данные о про-



изводительности процесса гибки труб различного типоразмера при ручной гибке труб и гибке с использованием автоматизированного комплекса.

Таким образом, предложенный автоматизированный комплекс:

- увеличивает производительность технологического процесса гибки труб;
- сокращает время технологическо-

го процесса в 16 раз;

- дает возможность снизить потери материала за счет уменьшения длины заготовки;
- обеспечивает высокое качество труб;
- снижает количество бракованных изделий.

**Производительность процесса гибки труб при ручной гибке
и с использованием автоматизированного комплекса**

Pipe bending performance under manual bending with the use of an automated complex

Типоразмер трубы	Ручная гибка		Гибка с использованием автоматизированного комплекса	
	Длина заготовки, мм	Время гибки, мин	Длина заготовки, мм	Время гибки, мин
6×1	370	6,00	460	0,80
6×1	1760	10,00	1840	1,30
8×1	1100	18,60	820	0,80
8×1	2050	15,00	1929	1,40
12×1	650	17,00	680	0,68
12×1	2310	39,00	2300	2,40

Заключение

Разработка и внедрение новых производственных технологий является важной задачей для машиностроения в условиях стремительной технологической конкуренции. Оперативное создание и оценка прототипов новой продукции в машиностроении стали возможны благодаря применению новых цифровых технологий.

Цифровая интеграция автоматизированного производственного комплекса по

изготовлению трубопроводов с цифровой системой предприятия уменьшает время передачи технологической информации. При использовании данных технологий существенно повышается эффективность производственных процессов и сокращаются затраты на процедуры обработки информации, необходимой при производстве продукции машиностроительного предприятия.

Библиографический список

1. Антипов Д.В., Иващенко А.В. Подходы к повышению производительности и качества производственных процессов предприятий машиностроения // Известия Самарского научного центра РАН. 2017. Т. 19. № 4-2. С. 300–309.
2. Петров А.В. Новые технологии в гибке труб: изготовление деталей любой сложности // Металлообработка. 2013. № 2 (74). С. 54–55.
3. Козлов А.В., Шеркунов В.Г. Компьютерное моделирование процесса гибки труб с раскатыванием //

- Известия ТУЛГУ. Технические науки. 2009. № 2-2. С. 28–33.
4. Кутин А.А., Ивашин С.С. Прогноз развития цифровых машиностроительных производств // Инновации. 2016. № 8 (214). С. 9–12.
5. Высокотехнологичный компьютерный инжиниринг: обзор рынков и технологий / научн. ред. К.В. Дорофеев, рук-ль группы В.Н. Княгинин. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2014. 110 с.
6. Попова А.П., Дубровина И.А. Менеджмент каче-



ства в машиностроении // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. 2016. Т. 2. С. 520–521.

7. Самойлов С.И., Горелов В.М., Браславский В.М. [и др.]. Технология тяжелого машиностроения. М.: Машгиз, 1962. 590 с.

8. Макиенко Н.И. Слесарное дело. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1968. 400 с.

9. Козлов А.В., Шеркунов В.Г. Исследование процесса холодной гибки тонкостенных труб с воздействием на изгибаемую трубу вращающимся деформирующим инструментом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2014. Вып. 10. Ч. 2. С. 34–47.

10. Вдовин С.И., Лунин К.С., Михайлов В.Н., Федоров Т.В. Инженерная теория гибки труб и изгиб моментом // Кузнечно-штамповочное производство.

Обработка материалов давлением. 2015. № 6. С. 3–6.

11. Миронов К.А., Козлов А.В., Шеркунов В.Г., Суворов А.Л. Исследование силовых характеристик при гибке труб с обкатыванием, с использованием автоматизированного модуля и ПК // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2015. № 2 (50). С. 45–48.

12. Максименков В.И., Федосеев В.И., Шевченко О.И. Исследование технологии изготовления трубопроводных систем среднемагистрального самолета // Вестник ВГТУ. 2011. № 11-2. С. 76–79.

13. Сотников А.Н. Производство гнутых отводов с применением технологии трехмерной гибки труб // Экспозиция. Нефть. Газ. 2012. № 3 (21). С. 8–11.

References

1. Antipov D.V., Ivashchenko A.V. Approaches to increasing the productivity and quality of production processes of engineering enterprises. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2017, vol. 19, no. 4-2, pp. 300–309. (In Russian)

2. Petrov A.V. New technologies in pipe bending: manufacturing of parts of any complexity. *Metalloobrabotka* [Metal Working]. 2013, no. 2 (74), pp. 54–55. (In Russian)

3. Kozlov A.V., Sherkunov V.G. Simulating the process of tube bending under expanding. *Izvestiya TULGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the TSU. Engineering Sciences]. 2009, no. 2-2, pp. 28–33. (In Russian)

4. Kutin A.A., Ivashin S.S. Forecast for development of digital engineering industries. *Innovatsii* [Innovations]. 2016, no. 8 (214), pp. 9–12. (In Russian)

5. *Vysokotekhnologichnyi komp'yuternyi inzhiniring: obzor rynkov i tekhnologii* [High-tech computer engineering: an overview of markets and technologies]. Saint-Petersburg: Polytechnical university Publ., 2014, 110 p. (In Russian)

6. Popova A.P., Dubrovina I.A. Quality management in engineering. *Aktual'nye problemy aviatsii i kosmonavтики* [Relevant Problems of Aviation and Cosmonautics]. 2016, vol. 2, pp. 520–521. (In Russian)

7. Samoilov S.I., Gorelov V.M., Braslavskii V.M. [et al.]. *Tekhnologiya tyazhelogo mashinostroeniya* [Technology of Heavy Engineering]. Moscow: Mashgiz Publ.,

1962, 590 p. (In Russian)

8. Makienko N.I. *Slesarnoe delo* [Metalworking]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1968, 400 p. (In Russian)

9. Kozlov A.V., Sherkunov V.G. Study of cold bending process of thin-walled tubes during exposure of rotating deforming tool to a bent tube. *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the TSU. Engineering Sciences]. 2014, issue 10, part. 2, pp. 34–47. (In Russian)

10. Vdovin S.I., Lunin K.S., Mikhailov V.N., Fedorov T.V. Engineering theory of flexible pipes and bending moment. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem* [Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure]. 2015, no. 6, pp. 3–6. (In Russian)

11. Mironov K.A., Kozlov A.V., Sherkunov V.G., Suворов A.L. The study of power characteristics during pipe bending with burnishing using an automated module and a PC. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2015, no. 2 (50), pp. 45–48. (In Russian)

12. Maksimenkov V.I., Fedoseev V.I., Shevchenko O.I. The research of manufacturing techniques of pipeline systems of the medium-range plane. *Vestnik VGTU* [Vestnik of Voronezh State Technical University]. 2011, no. 11-2, pp. 76–79. (In Russian)

13. Sotnikov A.N. The production of bent elbows with the use of three-dimensional pipe-bending technology. *Ekspozitsiya. Neft'. Gaz* [Exposition Oil & Gas]. 2012, no. 3 (21), pp. 8–11. (In Russian)

Критерии авторства

Лонцих П.А., Кунаков Е.П., Коршунова Е.И., Ковригина И.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Lontsikh P.A., Kunakov E.P., Korshunova E.I., Kovrigina I.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК: 621.787.4

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-50-66>

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ПОПЕРЕЧНОЙ ОБКАТКЕ ПЛОСКИМИ ПЛИТАМИ

© Лэ Хонг Куанг¹, С.А. Зайдес²

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Определить напряженное состояние и зону пластической деформации цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами. **МЕТОДЫ.** В работе использован математический аппарат, основанный на законах теории упругопластического твердого тела. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Получены аналитические зависимости для определения компонент напряжений и зоны пластической деформации при поперечной обкатке плоскими плитами. Результаты расчетов показали, что после поперечной обкатки в центре поперечного сечения заготовки имеет место напряженное состояние всестороннего растяжения, а в оболочке заготовки имеется напряженное состояние сжатия. Глубина зоны пластической деформации зависит от степени относительного обжатия и коэффициента трения между заготовкой и плитами. **ВЫВОДЫ.** Для упрочнения маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей предложен метод поперечной обкатки плоскими плитами. Разработанная математическая модель дает вполне достоверные значения напряженного состояния и зоны пластической деформации. При поперечной обкатке плоскими плитами радиус зоны упругой деформации зависит от степени относительного обжатия и коэффициента трения между заготовкой и плитами. Способ упрочнения поперечной обкаткой плоскими плитами исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области цилиндрических изделий.

Ключевые слова: поперечная обкатка, напряженное состояние, остаточное напряжение, упругопластическая деформация, упрочнение, разрушение.

Информация о статье. Дата поступления 02 апреля 2018 г.; дата принятия к печати 24 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования: Лэ Хонг Куанг, Зайдес С.А. Аналитическое определение напряженного состояния цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 50–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-50-66

ANALYTICAL DETERMINATION OF THE CYLINDRICAL PART STRESSED STATE UNDER TRANSVERSE BURNISHING BY FLAT PLATES

Le Hong Quang, S.A. Zaides

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

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is to determine the stress state and the plastic deformation zone of cylindrical parts under transverse burnishing by flat plates. **METHODS.** The mathematical apparatus based on the laws of the theory of elasto-plastic solid is used in the work. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** We have obtained analytical dependences for the determination of the stress components and the zone of plastic deformation under transverse burnishing by flat plates. The calculation results have shown that there is a stressed state of dilatation in the center of the workpiece cross-section and there is a stressed state of compression in the workpiece shell after the transverse burnishing. The depth of the plastic deformation zone depends on the degree of percentage reduction and the coefficient of friction

¹Лэ Хонг Куанг, аспирант, e-mail: mybo91@gmail.com

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

²Зайдес Семен Азикович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов, e-mail: zsa@istu.edu

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



between the workpiece and the plates. **CONCLUSIONS.** It is proposed to use the method of transverse burnishing by flat plates to harden low rigid cylindrical parts of the shaft and axle type. The developed mathematical model provides quite reliable values of the stressed state of the plastic deformation zone. The radius of the elastic deformation zone depends on the degree of percentage reduction and the coefficient of friction between the workpiece and the plates when transverse burnishing by flat plates. The hardening method employing transverse burnishing by flat plates eliminates cracking and material breakage in the central region of cylindrical products.

Keywords: *transverse burnishing; stressed state; residual stress; elastoplastic deformation, hardening, breakage*

Information about the article. Received April 02, 2018; accepted for publication August 24, 2018; available online September 28, 2018 2018.

For citation. Le Hong Quang, Zaides S.A. Analytical determination of the cylindrical part stressed state under transverse burnishing by flat plates. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 50–66. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-50-66 (In Russian)

Введение

Для отделочно-упрочняющей обработки деталей машин достаточно широко используются методы поверхностного пластического деформирования (ППД). В процессе ППД поверхностный слой претерпевает качественные изменения: сглаживаются микронеровности, повышается твердость и прочность, образуются остаточные напряжения сжатия, которые оказывают доминирующее влияние на циклическую прочность деталей [1]. Однако при обработке цилиндрических деталей типа валов и осей малой жесткости и небольших размеров возможности существующих способов ППД весьма ограничены. Упрочнять такие детали деформационной нагрузкой практически невозможно, так как они легко изгибаются при действии поперечной силы. Кроме того, возникают проблемы с закреплением детали при обработке (распространенная практика закрепления в центрах токарного станка в данном случае неприемлема).

С учетом вышеизложенного возникла необходимость поиска новой схемы обработки маложестких деталей ППД.

В технологии обработки металлов давлением успешно применяют метод поперечной прокатки, который используют для получения заготовок сложной формы, а также для профилирования различных метизов [2–4]. Широкое применение поперечной прокатки объясняется как ее технологическими достоинствами, так и значительной эффективностью обработки [2]. Плоско-прокатные станы имеют ряд преимуществ: простота изготовления и низкая стоимость плоского инструмента; отсутствие необходимости в направляющем инструменте; стабильное положение детали на плоскости инструмента; высокая стойкость плоского инструмента (до 500000 деталей); полная автоматизация процесса; высокая точность размеров прокатываемых деталей (0,01–0,5 мм). По сравнению, например, со штамповкой, прокатка обеспечивает повышение производительности в 1,5–2 раза, уменьшение расхода металлопроката на 10–30%, повышение точности, сокращение трудоемкости последующих операций, повышение стойкости инструмента (60–300 тыс. шт.) и значительное сокращение затрат на его изготовление [3].

Поэтому в качестве перспективного направления можно использовать способ поперечной обкатки как один из видов ППД. При разработке технологии поперечной прокатки в центральной зоне заготовки были обнаружены большие растягивающие напряжения [4], благодаря которым формируется зона с наличием трещин и повреждений. Для оценки возможности появления трещин в центральной области цилиндра при упрочнении поперечной обкаткой, необходимо рассчитать эквивалентность остаточного напряжения в центральной области цилиндра. Результаты определения остаточных напряжений в деталях, упрочненным поверхностным пластическим деформированием изложены в работах [5–7], а напряжение в очаге деформации при ППД представлены в исследованиях [8, 9].

Целью данной работы является определение напряженного состояния и зоны пластической деформации цилиндрических деталей при поперечной обкатке плоскими плитами.



Расчетная схема процесса поперечной обкатки

На рис. 1 изображена схема процесса поперечной обкатки плоскими плитам. Как видно из рисунка, ось вращения обкатываемого цилиндрического тела перпендикулярна направлению движения верхней плиты. Расстояние между плитами меньше исходного диаметра цилиндра на величину $2u$, за счет этого диаметр заготовки при обкатке уменьшается. Со стороны каждой из плит к заготовке прилагаются усилия, которые направлены нормально к контактной площадке. Равнодействующую этих усилий P будем считать приложенной в середине отрезка, соответствующего зоне контакта заготовки с плитами. Нормальные усилия вызывают появление на площадки контакта заготовки с плитами сил трения, равнодействующую которых обозначим через F . Силы трения F приложены в тех же точках, что и нормальные усилия P и направлены по касательным к площадке контакта.

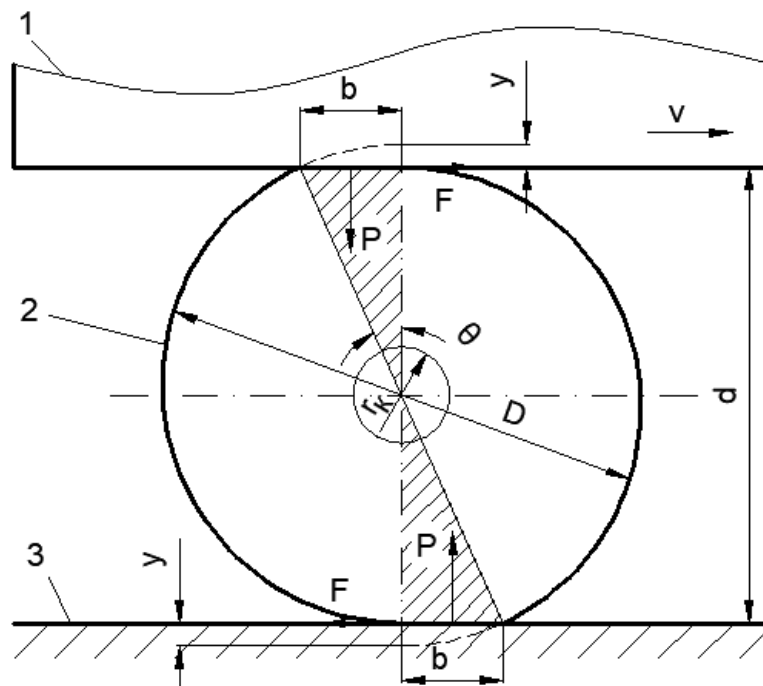


Рис. 1. Схема усилий при поперечной обкатке плоскими плитами: 1 – подвижная плита; 2 – заготовка; 3 – неподвижная плита; r_k – радиус упругого ядра
Fig. 1. Diagram of forces under transverse burnishing by flat plates: 1 – movable plate; 2 – workpiece; 3 – fixed plate; r_k – radius of the elastic core

Расчет напряжений при поперечной обкатке плоскими плитами

Как известно, напряженное состояние заготовки в общем случае характеризуется шестью составляющими напряжения [10, 11]. Отсутствие или наличие лишь малых удлинений по оси заготовки позволяет решать данную задачу как плоскую. Иными словами, положим, что деформации вдоль оси z запрещены во всех точках поперечного сечения заготовки и напряжения от координаты z не зависят [6, 12]. Кроме того, примем, что материал заготовки несжимаемый. Из этих допущений следует, что:

$$\tau_{z\theta} = \tau_{z\rho} = 0; \quad \sigma_z = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\theta}{2},$$

где $\tau_{z\theta}$, $\tau_{z\rho}$ – касательное напряжение; σ_z – осевое напряжение; σ_ρ – радиальное; σ_θ – тангенциальное напряжение.



Определение напряженного состояния для пластического слоя цилиндрического тела. В этом случае необходимо решить систему трех уравнений: два уравнения статического равновесия и условие пластичности ³[13–15]:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0; \quad \sigma_\rho - \sigma_\theta = \nu K. \quad (1)$$

где $\nu = \pm 1$, $K = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_T$ для случая энергетической теории предельного состояния; σ_T – предел текучести; $\tau_{\rho\theta}$ – касательное напряжение.

Первое из уравнений системы (1) приведем к виду:

$$\frac{\partial}{\partial \rho} (\rho \sigma_\rho) - \sigma_\theta + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} = 0.$$

Или с учетом последнего из уравнений системы (1)

$$\rho \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \rho} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} = 0.$$

После дифференцирования по θ получим:

$$\rho \frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \rho \partial \theta} = - \frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta^2}.$$

Второе из уравнений системы (1) после дифференцирования по ρ приводится к виду:

$$\rho \frac{\partial^2 \sigma_\theta}{\partial \rho \partial \theta} = - \rho^2 \frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho^2} - 3\rho \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho}.$$

Приравняв правые части последних двух равенств, будем иметь

$$\rho^2 \frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho^2} + 3\rho \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} - \frac{\partial^2 \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta^2} = 0.$$

Решение этого уравнения будем искать в виде произведения двух функций, одна из которых зависит только от ρ , а другая – только от θ :

$$\tau_{\rho\theta} = \Phi(\rho) \cdot \phi(\theta) = \Phi \cdot \phi. \quad (2)$$

С учетом этого можно записать:

³Мрочек Ж.А., Макаревич С.С., Кожуро Л.М. [и др.]. Остаточные напряжения: учеб. пособие. Минск: УП «Техно-принт», 2003. 352 с. / Mrochek Zh. A., Makarevich S.S., Kozhuro L.M. et al. Residual stresses: Learning aids. Minsk: UP "Technoprint" Publ., 2003, 352 p.



$$\rho^2 \frac{\Phi''}{\Phi} + 3\rho \frac{\Phi'}{\Phi} - \frac{\phi''}{\phi} = 0.$$

Пусть

$$-\frac{\phi''}{\phi} = -m^2; \quad \rho^2 \frac{\Phi''}{\Phi} + 3\rho \frac{\Phi'}{\Phi} = m^2, \quad (3)$$

где m – некоторое постоянное число.

Первое из этих уравнений перепишем как $\phi'' - m^2\phi = 0$. Его решение будет иметь вид:

$$\phi = Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}.$$

Решение уравнения $\rho^2\Phi'' + 3\rho\Phi' - m^2\Phi = 0$ будем искать в форме $\Phi = C\rho^n$. Отсюда $\Phi' = Cn\rho^{n-1}$; $\Phi'' = Cn(n-1)\rho^{n-2}$.

Подставляя выражения ϕ , Φ' , Φ'' во второе уравнение системы (3), получим его характеристическое уравнение: $n^2 + 2n - m^2 = 0$. Отсюда

$$n_1 = -1 + \sqrt{1 + m^2} = a; \quad n_2 = -1 - \sqrt{1 + m^2} = b. \quad (4)$$

Таким образом, $\Phi = C_1\rho^a + C_2\rho^b$.

Подставив выражения функций ϕ и Φ в выражение (2), находим:

$$\tau_{\rho\theta} = (C_1\rho^a + C_2\rho^b)(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}). \quad (5)$$

Первое из уравнений системы (1) с учетом условия пластичности и равенства (5) приобретает вид:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} = -m \cdot (C_1\rho^{a-1} + C_2\rho^{b-1})(Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) - \frac{\nu K}{\rho}.$$

После интегрирования получаем

$$\sigma_\rho = -m \cdot \left(\frac{C_1\rho^a}{a} + \frac{C_2\rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) - \nu K \ln \rho + f(\theta). \quad (6)$$

Второе дифференциальное уравнение равновесия из системы (1) перепишем следующим образом:

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = -\rho \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} - 2\tau_{\rho\theta}.$$

Принимая во внимание выражение (5), находим:

$$\frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} = -[C_1(a+2)\rho^a + C_2(b+2)\rho^b](Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}).$$



Из соотношений (4) имеем:

$$a + 2 = \frac{m^2}{a}; b + 2 = \frac{m^2}{b}.$$

Поэтому

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} &= -m^2 \cdot \left(\frac{C_1 \rho^a}{a} + \frac{C_2 \rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}). \\ \sigma_\theta &= -m \cdot \left(\frac{C_1 \rho^a}{a} + \frac{C_2 \rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) + f_1(\rho). \end{aligned} \quad (7)$$

На основании уравнений (6) и (7) имеем $\sigma_\rho - \sigma_\theta = -\nu K \ln \rho + f(\theta) - f_1(\rho)$.

Условие пластичности, как известно, было записано в виде $\sigma_\rho - \sigma_\theta = \nu K$.

Приравняв правые части последних двух равенств, получаем:

$$-\nu K \ln \rho + f(\theta) - f_1(\rho) = \nu K.$$

Отсюда следует, что $f(\theta) = \text{const}$, и поэтому $f_1(\rho) = -\nu K (\ln \rho + 1) + C$.

Таким образом, имеем следующую систему уравнений для определения компонентов тензора напряжений в пластическом слое цилиндрического тела ($r_k \leq \rho \leq r$):

$$\begin{cases} \tau_{\rho\theta} = (C_1 \rho^a + C_2 \rho^b) (Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}) \\ \sigma_\rho = -m \cdot \left(\frac{C_1 \rho^a}{a} + \frac{C_2 \rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) - \nu K \ln \rho + C \\ \sigma_\theta = -m \cdot \left(\frac{C_1 \rho^a}{a} + \frac{C_2 \rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) - \nu K (\ln \rho + 1) + C \\ \sigma_z = -m \cdot \left(\frac{C_1 \rho^a}{a} + \frac{C_2 \rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) - \nu K \left(\ln \rho + \frac{1}{2} \right) + C \end{cases} \quad (8)$$

Определение напряженного состояния для упругого ядра цилиндрического тела. В этом случае необходимо решить систему трех уравнений: два уравнения статического равновесия и условие упругости^{3,4}[13, 15]:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0; \quad \sigma_\rho - \sigma_\theta = \nu K n \frac{\rho}{r}, \quad (9)$$

где величина $n = \frac{r}{r_k}$; r – радиус пластически деформируемой оболочки; r_k – радиус упругого ядра.

⁴Попова В.В. Поверхностное пластическое деформирование и физико-химическая обработка: учеб. пособие. Рубцовск: Изд-во Рубцовского индустриального института, 2013. 98 с. / Popova V.V. Surface plastic deformation and physico-chemical treatment. Rubtsovsk: Rubtsovsk Industrial Institute Publ., 2013, 98 p.



Аналогично вышеизложенному решим систему уравнений (9) и получим компоненты тензора напряжений в упругом ядре цилиндрического тела ($0 \leq \rho \leq r_k$):

$$\begin{cases} \tau_{\rho\theta} = (C_1\rho^a + C_2\rho^b)(Ae^{m\theta} + Be^{-m\theta}) \\ \sigma_\rho = -m \cdot \left(\frac{C_1\rho^a}{a} + \frac{C_2\rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) - \nu Kn \frac{\rho}{r} + \nu K \left(\ln \frac{n}{r} + 1 \right) + C \\ \sigma_\theta = -m \cdot \left(\frac{C_1\rho^a}{a} + \frac{C_2\rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) - 2\nu Kn \frac{\rho}{r} + \nu K \left(\ln \frac{n}{r} + 1 \right) + C \\ \sigma_z = -m \cdot \left(\frac{C_1\rho^a}{a} + \frac{C_2\rho^b}{b} \right) (Ae^{m\theta} - Be^{-m\theta}) - \frac{3}{2} \nu Kn \frac{\rho}{r} + \nu K \left(\ln \frac{n}{r} + 1 \right) + C \end{cases} \quad (10)$$

Определение напряженного состояния в зонах, подвергающихся непосредственному воздействию инструмента. Зона заготовки, подвергающаяся непосредственному воздействию рабочего инструмента, изображена на рис. 1 заштрихованными областями. Здесь же дана схема усилий, приложенных со стороны плит к заготовке при поперечной обкатке. В каждой точке поверхности контакта заготовки с плитами действуют нормальное усилие P и сила трения F . Угол θ соответствует зоне контакта. Ввиду малой величины угла θ можно принять

$$\sigma_\rho \approx P ; \tau_{\rho\theta} \approx F. \quad (11)$$

Связь между удельным давлением и удельной силой трения примем в таком виде:

$$F = \mu \cdot P,$$

где μ – коэффициент трения.

При этом на основании формулы (11) $F = \mu \cdot \sigma_\rho$.

На основании опытов, результаты которых представлены в работах [13, 15], было установлено, что касательные напряжения уменьшаются по мере перехода от периферии заготовки к центру ее сечения так, что в центре заготовки, во всяком случае, они не могут быть бесконечно велики. На этом основании в первом равенстве (10) можно принять $C_2 = 0$.

Пусть $C_3 = C_1 \cdot A$ и $C_4 = C_1 \cdot B$, тогда система уравнений компонентов тензора напряжений (9) ($r_k \leq \rho \leq r$) имеет вид:

$$\begin{cases} \tau_{\rho\theta} = \rho^a (C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}) \\ \sigma_\rho = -m \cdot \frac{\rho^a}{a} (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) - \nu K \ln \rho + C \\ \sigma_\theta = -m \cdot \frac{\rho^a}{a} (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) - \nu K (\ln \rho + 1) + C \\ \sigma_z = -m \cdot \frac{\rho^a}{a} (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) - \nu K \left(\ln \rho + \frac{1}{2} \right) + C \end{cases} \quad (12)$$

а система уравнений (10) компонентов тензора напряжений ($0 \leq \rho \leq r_k$) –



$$\begin{cases} \tau_{\rho\theta} = \rho^a (C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}) \\ \sigma_\rho = -m \cdot \frac{\rho^a}{a} (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) - \nu K n \frac{\rho}{r} + \nu K \left(\ln \frac{n}{r} + 1 \right) + C \\ \sigma_\theta = -m \cdot \frac{\rho^a}{a} (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) - 2\nu K n \frac{\rho}{r} + \nu K \left(\ln \frac{n}{r} + 1 \right) + C \\ \sigma_z = -m \cdot \frac{\rho^a}{a} (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) - \frac{3}{2} \nu K n \frac{\rho}{r} + \nu K \left(\ln \frac{n}{r} + 1 \right) + C \end{cases} \quad (13)$$

Напряжения на поверхности контакта определим приближенно, положив в основу такой задачи гипотезу плоских сечений, но связь между касательными и нормальными напряжениями на поверхности контакта примем в виде

$$\tau_{\rho\theta} = \mu \sigma_\rho.$$

Проектируя на ось ρ все силы, действующие на элемент тела, приравняем их нулю. Разрешаем полученное уравнение совместно с условием пластичности и получаем

$$\sigma_\rho = K e^{\mu\theta}. \quad (14)$$

При $\rho = r$ из второго равенств (12) и (14) получаем

$$-m \cdot \frac{r^a}{a} (C_3 e^{m\theta} - C_4 e^{-m\theta}) - \nu K \ln r + C = -K e^{-\mu\theta}.$$

Отсюда следует, что:

$$\begin{cases} C_4 = 0 \\ C_3 = -\frac{K \cdot a}{\mu r^a} \\ C = \nu K \ln r \\ m = \mu \end{cases} \quad (15)$$

Поставляя эти выражения в равенства (12) и (13), получаем следующие выражения напряжения:

– напряженные состояния в пластической оболочке ($r_\kappa \leq \rho \leq r$):

$$\begin{cases} \frac{\tau_{\rho\theta}}{K} = -\frac{a}{\mu} \left(\frac{\rho}{r} \right)^a \cdot e^{\mu\theta} \\ \frac{\sigma_\rho}{K} = -\left(\frac{\rho}{r} \right)^a e^{\mu\theta} + \nu \ln \frac{r}{\rho} \\ \frac{\sigma_\theta}{K} = -\left(\frac{\rho}{r} \right)^a e^{\mu\theta} + \nu \left(\ln \frac{r}{\rho} - 1 \right) \\ \frac{\sigma_z}{K} = -\left(\frac{\rho}{r} \right)^a e^{\mu\theta} + \nu \left(\ln \frac{r}{\rho} - \frac{1}{2} \right) \end{cases}; \quad (16)$$



– напряженные состояния в упругом ядре ($0 \leq \rho \leq r_k$):

$$\begin{cases} \frac{\tau_{\rho\theta}}{K} = -\frac{a}{\mu} \left(\frac{\rho}{r} \right)^a \cdot e^{\mu\theta} \\ \frac{\sigma_\rho}{K} = -\left(\frac{\rho}{r} \right)^a e^{\mu\theta} - \nu \left(n \frac{\rho}{r} - \ln n - 1 \right) \\ \frac{\sigma_\theta}{K} = -\left(\frac{\rho}{r} \right)^a e^{\mu\theta} - \nu \left(2n \frac{\rho}{r} - \ln n - 1 \right) \\ \frac{\sigma_z}{K} = -\left(\frac{\rho}{r} \right)^a e^{\mu\theta} - \nu \left(\frac{3}{2} n \frac{\rho}{r} - \ln n - 1 \right) \end{cases} \quad (17)$$

В равенства (16) и (17) входит величина $a = \sqrt{1+m^2} - 1 = \sqrt{1+\mu^2} - 1$, величину θ можно рассчитать по следующей формуле (см. рис. 1):

$$\theta = \arccos \left(1 - \frac{2y}{D} \right).$$

На рис. 2 по формулам (16) и (17) построены эпюры нормальных и касательных напряжений, которые показывают, что в центре поперечного сечения заготовки имеет место напряженное состояние всестороннего растяжения, а касательное напряжение равно нулю.

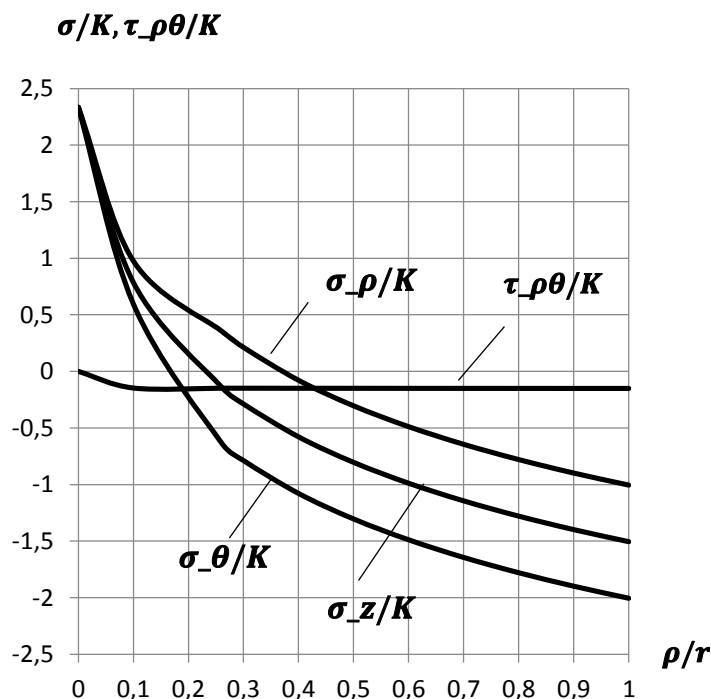


Рис. 2. Распределение напряжений в зонах, подвергающихся непосредственному воздействию инструмента при поперечной обкатке плоскими плитами
(при $D = 10$ мм; $y = 0,05$ мм; $\mu = 0,15$; $n = 3,8$)

Fig. 2. Stress distribution in the zones subjected to the direct tool impact under transverse burnishing by flat plates (at $D = 10$ mm; $y = 0.05$ mm; $\mu = 0.15$; $n = 3.8$)



Определение напряженного состояния в зонах, не подвергающихся непосредственному воздействию инструмента. Зоны, не подвергающиеся непосредственному воздействию инструмента, на рис. 1 изображены незаштрихованными областями. Для этих зон имеем следующие граничные условия:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = 0 \\ \tau_{\rho\theta} = 0 \end{cases} \text{ при } \rho = r. \quad (18)$$

Принимая во внимание второе из равенств (18), на основании первого выражения (12) для напряжения $\tau_{\rho\theta}$ запишем:

$$\tau_{\rho\theta} = \rho^{\sqrt{1+m^2}-1} (C_3 e^{m\theta} + C_4 e^{-m\theta}) = 0.$$

Правая часть равенства при любых значениях θ может быть равна нулю лишь при условии, если:

$$C_3 = C_4 = 0. \quad (19)$$

Принимая во внимание (18) и (19), на основании второго из равенств (12) получим:

$$C = \nu K \ln r. \quad (20)$$

Поставляя равенства (19) и (20) в формулы (12) и (13), получим:

– напряженное состояние в пластическом слое ($r_\kappa \leq \rho \leq r$):

$$\begin{cases} \frac{\sigma_\rho}{K} = -\nu \ln \frac{\rho}{r} \\ \frac{\sigma_\theta}{K} = -\nu \left(\ln \frac{\rho}{r} + 1 \right); \\ \frac{\sigma_z}{K} = -\nu \left(\ln \frac{\rho}{r} + \frac{1}{2} \right) \end{cases} \quad (21)$$

– напряженное состояние в упругом ядре ($0 \leq \rho \leq r_\kappa$):

$$\begin{cases} \frac{\sigma_\rho}{K} = -\nu \left(n \frac{\rho}{r} - \ln n - 1 \right) \\ \frac{\sigma_\theta}{K} = -\nu \left(2n \frac{\rho}{r} - \ln n - 1 \right); \\ \frac{\sigma_z}{K} = -\nu \left(\frac{3}{2} n \frac{\rho}{r} - \ln n - 1 \right) \end{cases} \quad (22)$$

На рис. 3 по формулам (21) и (22) построены эпюры напряжений по сечению цилиндра после поперечной обкатки плоскими плитами при диаметре заготовки $D = 10$ мм; абсолютном обжатии $2y = 0,1$ мм; $\mu = 0,15$; $n = 3,8$.

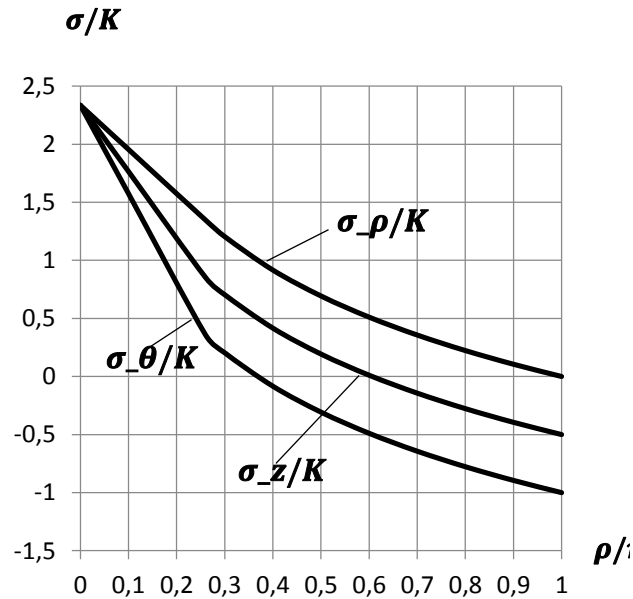


Рис. 3. Распределение напряжений в зонах, не подвергающихся непосредственному воздействию инструмента при поперечной обкатке плоскими плитами (при $D = 10$ мм; $y = 0,05$ мм; $\mu = 0,15$; $n = 3,8$)

Fig. 3. Stress distribution in the zones not exposed to direct tool impact under transverse burnishing by flat plates (at $D = 10$ mm; $y = 0.05$ mm; $\mu = 0.15$; $n = 3.8$)

Определение зоны упругой и пластической деформации при поперечной обкатке. Выражения (16) и (17) описывают напряженное состояние в зонах заготовки, которые подвергаются непосредственному воздействию рабочего инструмента. Уравнения (21) и (22) выражают напряженное состояние в зонах заготовки, которые не подвергаются непосредственному воздействию инструмента. Отличаются эти две системы уравнений тем, что в уравнениях (16) и (17) имеются одинаковые члены:

$$-\left(\frac{\rho}{r}\right)^{\sqrt{1+\mu^2}-1} \cdot e^{\mu\theta},$$

представляющие собой величину напряжения от внешних сил.

Предположим, что нас интересует напряженное состояние в первый момент обработки. В этом случае напряжения от неравномерной деформации еще не получили развития. Поэтому, полагая в равенствах (16) и (17) соответствующие члены равными нулю, получим такие выражения для напряжений:

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = \frac{\sigma_\theta}{K} = \frac{\sigma_z}{K} = -\left(\frac{\rho}{r}\right)^{\sqrt{1+\mu^2}-1} \cdot e^{\mu\theta}. \quad (23)$$

Процесс воздействия плит в начале обкатки можно трактовать как процесс внедрения жесткого упруго напряженного клина в податливую пластическую массу остальной части тела, вследствие чего будет происходить ее пластическая деформация. Эта пластическая деформация будет осуществляться в периферийной части заготовки, где нормальные напряжения превосходят истинное сопротивление деформации тела. Границу распространения пластической деформации можно найти из условия [11, 13]:



$$\frac{\sigma_\rho}{K} = \frac{\sigma_\theta}{K} = \frac{\sigma_z}{K} = -1.$$

Принимая во внимание это условие, найдем из равенства (23):

$$\frac{\rho}{r} = e^{-\frac{\mu\theta}{\sqrt{1+\mu^2}-1}}. \quad (24)$$

Из рис. 1 получим угол

$$\theta = \arccos\left(1 - \frac{2y}{D}\right), \quad (25)$$

где $\frac{2y}{D} \cdot 100\%$ – степень относительного обжатия.

Согласно [16] предел степени относительного обжатия

$$\frac{2y}{D} \cdot 100\% = \frac{2\mu^2}{2\mu^2 + 1} \cdot 100\% = 4,3\% \text{ для материала заготовки Ст45 с коэффициентом трения } \mu = 0,2.$$

По равенствам (24), (25) построены кривые, характеризующие границу зон распространения пластической деформации при степени обжатия, равной 1%, в процессе поперечной обкатки плоскими плитами (рис. 4).

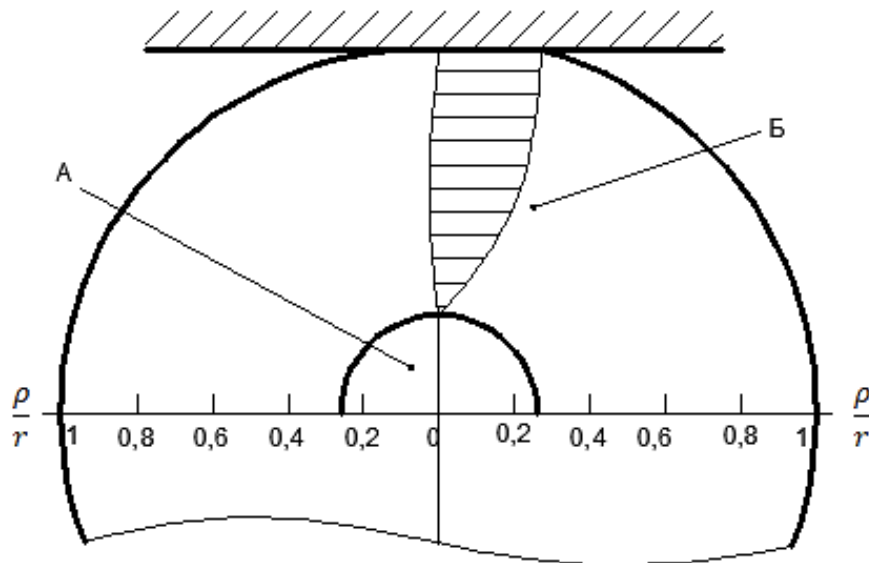


Рис. 4. Зоны распределения пластической деформации при степени относительного обжатия 1%:

А – зона упругой деформации; Б – зона пластической деформации

Fig. 4. Distribution zones of plastic deformation under percentage reduction of 1%:

A – zone of elastic deformation; B – zone of plastic deformation

На рис. 4 показано что, при степени относительного обжатия, равной 1%, зона пластической деформации находится в пределе $0,26 \leq \frac{\rho}{r} \leq 1$ по сечению вала и радиус упругого ядра равен $r_k = 0,26r$.



Расчет остаточных напряжений после поперечной обкатки плоскими плитами

Основные уравнения теории упругости для плоской задачи в цилиндрической системе координат имеют вид ⁴[6, 7]:

$$\frac{\partial \sigma_\rho}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \theta} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0; \quad \frac{1}{\rho} \frac{\partial \sigma_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\rho\theta}}{\partial \rho} + \frac{2\tau_{\rho\theta}}{\rho} = 0; \quad \nabla^2 (\sigma_\rho + \sigma_\theta) = 0, \quad (26)$$

где $\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}$ – оператор Лапласа.

С помощью функции напряжений $\phi(\rho, \theta)$ (функции Эри) получены следующие выражения для напряжения в цилиндрических координатах, при этом удовлетворяются все уравнения теории упругости (26) [5, 9]:

$$\sigma_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2}; \quad \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \rho^2}; \quad \tau_{\rho\theta} = -\frac{\partial}{\partial \rho} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} \right). \quad (27)$$

Подставляя нормальные напряжения, выраженные через функцию Эри в третье уравнение равенств (26), получим бигармоническое уравнение: $\nabla^4(\phi) = 0$.

В связи с этим бигармоническое уравнение $\nabla^4(\phi) = 0$ в цилиндрической системе координат приобретает следующий вид:

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \right) \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial \rho} + \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial^2 \phi}{\partial \theta^2} \right) = 0. \quad (28)$$

После поперечной обкатки плоскими плитами получены валы, имеющие компоненты напряжений симметричного распределения, которые не зависят от угла θ (т.е. являются только функцией радиуса ρ), а касательное напряжение $\tau_{\rho\theta} = 0$. Тогда уравнение равновесия в цилиндрической системе координат имеет вид:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0. \quad (29)$$

Условие совместности (28) можно переписать в виде

$$\left(\frac{d^2}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \right) \left(\frac{d^2 \phi}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{d\phi}{d\rho} \right) = 0,$$

Или

$$\frac{d^4 \phi}{d\rho^4} + \frac{2}{\rho} \frac{d^3 \phi}{d\rho^3} - \frac{1}{\rho^2} \frac{d^2 \phi}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho^3} \frac{d\phi}{d\rho} = 0. \quad (30)$$

Уравнение (30) – линейное однородное дифференциальное уравнение четвертого порядка типа Эйлера. Решая это дифференциальное уравнение, получим:



$$\phi = A \ln \rho + B \rho^2 \ln \rho + C \rho^2 + D. \quad (31)$$

Компоненты напряжений на основании уравнения (29) можно найти по формулам:

$$\sigma_\rho = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \phi}{\partial \rho} = \frac{A}{\rho^2} + B(1 + 2 \ln \rho) + 2C; \quad \sigma_\theta = \frac{\partial^2 \phi}{\partial \rho^2} = -\frac{A}{\rho^2} + B(3 + 2 \ln \rho) + 2C. \quad (32)$$

Для расчета величины остаточных напряжений, возникающих в цилиндре в результате поперечной обкатки, сформулируем на основании условий статики и приведенных данных граничные условия [6, 16, 17]:

$$\begin{cases} \sigma_\rho = 0 & \text{при } \rho = r \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = \nu K & \text{при } \rho = r \\ \sigma_\rho - \sigma_\theta = 0 & \text{при } 0 \leq \rho \leq r_\kappa \end{cases}. \quad (33)$$

Используя третье из граничных условий (33) в формуле (32), находим

$$B = A/r_\kappa^2. \quad (34)$$

Принимая во внимание (34) и используя первое и второе граничные условия, получим

$$A = -\frac{\nu K (r_\kappa)^2}{2 \left[1 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]}; \quad B = -\frac{\nu K}{2 \left[1 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]}; \quad 2C = -\frac{\nu K}{2} + \frac{\nu K (\ln r + 1)}{\left[1 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]}. \quad (35)$$

Подставляя значения констант в формулы (32) и принимая с учетом граничных условий $\nu = \pm 1$, найдем выражение для остаточных напряжений в пластическом слое цилиндрического тела ($r_\kappa < \rho \leq r$):

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = \frac{2 \ln \frac{r}{\rho} - \left[\left(\frac{r_\kappa}{\rho} \right)^2 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]}{2 \left[1 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]}; \quad \frac{\sigma_\theta}{K} = \frac{2 \ln \frac{r}{\rho} - \left[2 - \left(\frac{r_\kappa}{\rho} \right)^2 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]}{2 \left[1 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]}; \quad \frac{\sigma_z}{K} = \eta \left[\frac{\ln \frac{r}{\rho}}{\left[1 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]} - 1 \right], \quad (36)$$

где η – коэффициент Пуассона.

Если принять $0 \leq \rho \leq r_\kappa$, то будем иметь остаточные напряжения в упругом ядре цилиндрического тела:

$$\frac{\sigma_\rho}{K} = \frac{\sigma_\theta}{K} = \frac{\ln \frac{r}{r_\kappa}}{\left[1 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]} - \frac{1}{2}; \quad \frac{\sigma_z}{K} = \eta \left[\frac{\ln \frac{r}{\rho}}{\left[1 - \left(\frac{r_\kappa}{r} \right)^2 \right]} - 1 \right]. \quad (37)$$



Из рис. 4 имеем величину $r_k/r = 0,26$ при степени обжатия 1%. По равенствам (36), (37) построены эпюры остаточных напряжений после поперечной обкатки при степени относительного обжатия 1% и коэффициенте Пуассона $\eta = 0,3$ (рис. 5). Если коэффициент Пуассона $\eta = 0,5$, т.е. принимается условие постоянства объема, то эпюра осевого напряжения имеет вид, изображенный пунктиром.

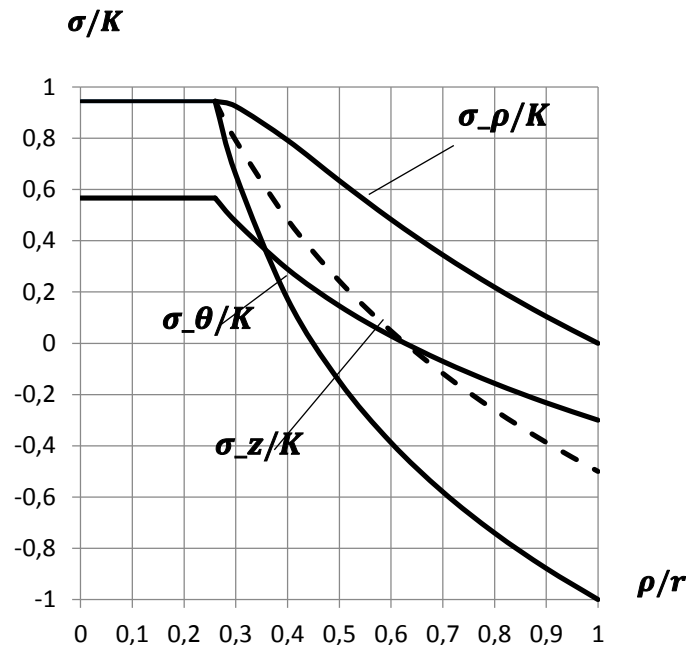


Рис. 5. Распределение остаточных напряжений по сечению цилиндра после поперечной обкатки плоскими плитами при степени относительного обжатия 1%

Fig. 5. Distribution of residual stresses along the cylinder section after transverse burnishing by flat plates with the percentage reduction of 1%

Из рис. 5 следует, что в центре поперечного сечения остаточные напряжения являются растягивающими. Наружные слои заготовки деформируются по толщине в большей мере, чем внутренние. За счет уменьшения толщины периметр наружных слоев стремится возрасти, и, следовательно, возникает состояние, при котором внешние слои стремятся к отрыву от сердцевины вала. Поэтому возникают растягивающие радиальные напряжения, максимальные в центре и равные нулю на периферии. Тангенциальные напряжения уравниваются радиальными, а осевые напряжения уравниваются между собой.

Для оценки опасности появления трещин в центральной области цилиндра при упрочнении поперечной обкаткой рассчитана эквивалентность остаточного напряжения в центральной области цилиндра по формуле Губера – Мизеса [17, 18]:

$$\sigma_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_\rho - \sigma_z)^2}. \quad (38)$$

Из рис. 5 и по формуле (38) эквивалентность остаточного напряжения в центральной области цилиндра равна нулю (при коэффициенте Пуассона $\eta = 0,5$) или весьма мала, т.е. меньше, чем предел текучести материала ($\sigma_s = 0,4\sigma_T$ при коэффициенте Пуассона $\eta = 0,3$). Поэтому способ упрочнения поперечной обкаткой плоскими плитами исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области цилиндрических изделий.



Выводы

1. Предложен математический подход для расчета напряженного состояния при поперечной обкатке маложестких цилиндрических деталей плоскими плитами. Получены аналитические зависимости для определения компонент напряжений и зоны пластической деформации при поперечной обкатке.

2. Результаты расчетов показали, что после поперечной обкатки в центре поперечного сечения заготовки имеет место напряженное состояние всестороннего растяжения, а в оболочке заготовки – напряженное состояние сжатия. Глубина зоны пластической деформации зависит от степени относительного обжатия и коэффициента трения между заготовкой и плитами.

3. В результате упрочнения поперечной обкаткой плоскими плитами эквивалентность остаточного напряжения в центральной области цилиндра весьма мала (меньше, чем предел текучести материала), что исключает образование трещин и разрушение материала в центральной области цилиндрических изделий.

Библиографический список

1. Зайдес С.А., Емельянов В.Н. Влияние поверхностного пластического деформирования на качество валов: монография. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. 380 с.
2. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки / под ред. А.В. Степаненко. Минск: Наука и техника, 1986. 223 с.
3. Клушин В.А., Рудович А.О. Технология и оборудование поперечно-клиновой прокатки: монография. Минск: Изд-во ФТИ НАН Беларуси, 2010. 300 с.
4. Томленов А.Д. Механика процессов обработки металлов давлением. М.: Машгиз, 1963. 234 с.
5. Зайдес С.А., Климова Л.Г., Управление технологическими остаточными напряжениями в маложестких валах охватываемым деформированием // Вестник ИргТУ. 2006. № 4 (28). С. 46–51.
6. Зайдес С.А., Фам Дак Фыонг. Аналитический расчет остаточных напряжений при упрочнении цилиндрических деталей поперечной обкаткой // Вестник ИргТУ. 2015. № 12 (107). С. 40–46.
7. Саушкин М.Н., Радченко В.П., Павлов В.Ф. Метод расчета полей остаточных напряжений и пластических деформаций в цилиндрических образцах с учетом анизотропии процесса поверхностного упрочнения // Прикладная механика и техническая физика. 2011. Т. 52. № 2. С. 173–182.
8. Зайдес С.А., Рудых Н.В. Определение напряженного состояния поверхностно-упрочненного слоя // Вестник ИргТУ. 2011. № 12(59). С. 35–38.
9. Смеленский В.М., Блюменштейн В.Ю. Механика технологического исследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин: монография. М.: Машиностроение, 2007. 400 с.
10. Биргер И.А. Остаточные напряжения. М.: Машиностроение, 1963. 235 с.
11. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1978. 360 с.
12. Кузнецова Е.В., Горбач О.Н., Кузнецов Р.В., Мелехин А.Ю., Горбач К.В. Влияние технологических параметров изготовления на уровень остаточных напряжений в оболочках тепловыделяющих элементов // Прикладная математика и вопросы управления. 2017. № 4. С. 118–131.
13. Грудев А.П. Теория прокатки. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 280 с.
14. Емельянов В.Н., Васильев П.Г., Олисов В.Н. Правка прямых валов поверхностным пластическим деформированием // Автоматизированное проектирование в машиностроении. 2014. № 2. С. 92–97.
15. Королев А.В., Балаев А.Ф., Савран С.А. Математическая модель вибромеханической стабилизации геометрических параметров длинномерных деталей // Успехи современной науки. 2016. Т. 2. № 7. С. 73–76.
16. Фам Дак Фыонг, Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании // Вестник ИргТУ. 2015. № 4 (99). С. 48–52.
17. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах / под общ. ред. Д.Г. Красковского. М.: Компьютер Пресс, 2002. 224 с.
18. Haghpanah B., Nayed-Hashemi H., Aziri A.V. Elasto-plastic stresses in a functionally graded rotating disk // ASME J. Eng. Mater. Technol. 2012. Vol. 134. Issue 2.

References

1. Zaides S.A., Emel'yanov V.N. *Vliyanie poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya na kachestvo valov* [Influence of surface plastic deformation on shaft quality]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2017, 380 p. (In Russian)



2. Shchukin V.Ya. *Osnovy poperechno-klinovoi prokatki* [Fundamentals of cross-wedge rolling]. Minsk: Science and Technology Publ., 1986, 223 p.
3. Klushin V.A., Rudovich A.O. *Tekhnologiya i oborudovanie poperechno-klinovoi prokatki* [Technology and equipment of cross-wedge rolling]. Minsk: Publishing House of Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus State Scientific Institution, 2010, 300 p.
4. Tomlenov A.D. *Mekhanika protsessov obrabotki metallov davleniem* [Mechanics of metal pressure working processes]. Moscow: Mashgiz Publ., 1963, 234 p. (In Russian)
5. Zaides S.A., Klimova L.G. Control of technological residual stresses in low-rigid shafts by embracing deformation. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2006, no. 4 (28), pp. 46–51. (In Russian)
6. Zaides S.A., Fam Dak Fyong. Analytical calculation of residual stresses under cylindrical part hardening by cross rolling. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 12 (107), pp. 40–46. (In Russian)
7. Saushkin M.N., Radchenko V.P., Pavlov V.F. Method of calculating residual stress fields and plastic deformations in cylindrical samples with allowance for the anisotropy of surface hardening. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* [Applied Mechanics and Technical Physics]. 2011, vol. 52, no. 2, pp. 173–182. (In Russian)
8. Zaides S.A., Rudykh N.V. Determination of the stressed state of the surface-hardened layer. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2011, no. 12 (59), pp. 35–38. (In Russian)
9. Smelenskii V.M., Blyumenshtein V.Yu. *Mekhanika tekhnologicheskogo issledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detalei mashin* [Mechanics of the technological research at the stages of machine part processing and operation]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2007, 400 p. (In Russian)
10. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1963, 235 p. (In Russian)
11. Gromov N.P. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal pressure working]. Moscow: Metallurgiya Publ., 1978, 360 p. (In Russian)
12. Kuznetsova E.V., Gorbach O.N., Kuznetsov R.V., Melekhin A.Yu., Gorbach K.V. Influence of technological parameters of production on the level of residual stresses in covers of fuel elements. *Prikladnaya matematika i voprosy upravleniya* [Applied Mathematics and Control Sciences]. 2017, no. 4, pp. 118–131. (In Russian)
13. Grudev A.P. *Teoriya prokatki* [The theory of rolling]. Moscow: Internet Engineering Publ., 2001, 280 p. (In Russian)
14. Emel'yanov V.N., Vasil'ev P.G., Olisov V.N. Flattening of direct shafts by surface plastic deformation. *Avtomatizirovannoe proektirovanie v mashinostroenii* [Automated Design in Mechanical Engineering]. 2014, no. 2, pp. 92–97. (In Russian)
15. Korolev A.V., Balaev A.F., Savran S.A. Mathematical model of vibromechanical stabilization of geometric parameters of lengthy parts. *Uspekhi sovremennoi nauki* [Modern Science Success]. 2016, vol. 2, no. 7, pp. 73–76. (In Russian)
16. Fam Dak Fyong, Zaides S.A., Nguen Van Khuan. Determination of transverse burnishing conditions under surface plastic deformation. *Vestnik IrGTU*. [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2015, no. 4 (99), pp. 48–52. (In Russian)
17. Basov K.A. *ANSYS v primerakh i zadachakh* [ANSYS in examples and problems]. Moscow: Computer Press Publ., 2002, 224 p. (In Russian)
18. Haghpanah B., Nayed-Hashemi H., Aziri A.V. Elasto-plastic stresses in a functionally graded rotating disk. *ASMEJ. Eng. Mater. Technol.* 2012, vol. 134, issue 2.

Критерии авторства

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

Authorship criteria

Le Hong Quang, Zaides S.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.91.01

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-67-81>

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ НА ОСНОВЕ ОЦЕНКИ ДИНАМИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ

© А.С. Пятых¹

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Повышение динамической устойчивости и производительности обработки отверстий. **МЕТОДЫ.** Теоретические основы исследования базируются на научных аспектах технологии машиностроения и резания материалов, моделирования, активного эксперимента. Экспериментальные данные получены с помощью измерительных приборов: программного комплекса на базе профилометра Taylor Hobson Form Talysurf i200, координатно-измерительной машины Carl Zeiss CONTURA G2, устройства для контроля геометрических параметров Zoller Genius 3, динамометрических комплексов Kistler 9129AA и 9253B23, аппаратно-программного комплекса CutPro и др. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** С помощью разработанной математической модели процесса сверления решена задача повышения производительности, качества поверхности и точности отверстий в деталях из алюминиевых сплавов путем выбора оптимальных режимов резания на основе диаграммы динамической устойчивости. Созданная математическая модель зависимости точности отверстий от длины рабочей части спирального сверла и режимов резания позволяет прогнозировать точность отверстия на этапе проектирования технологического процесса. Рассчитанные модальные параметры инструментальной наладки на базе цельного твердосплавного сверла могут быть использованы при построении диаграмм устойчивости процесса сверления. Разработанная методика исследования зажимных патронов позволяет оценить их влияние на динамическую устойчивость процесса сверления, на качество и точность полученных отверстий. **ВЫВОДЫ.** По результатам экспериментальных исследований предложено использовать гидропластовый зажимной патрон при сверлении отверстий с требуемой точностью (IT7-8). Экспериментально определенные коэффициенты модели сил резания позволяют учесть физико-механические свойства алюминиевых сплавов В95пчТ2, 1933Т2, 1163Т при моделировании процесса сверления как в специальных программных продуктах, так и с использованием языков программирования высокого уровня.

Ключевые слова: точность отверстий, моделирование сверления, регрессионное уравнение, режимы резания, динамика резания.

Информация о статье. Дата поступления 06 июня 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Пятых А.С. Повышение производительности и качества обработки отверстий на основе оценки динамики процесса резания // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 67–81. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-67-81

IMPROVING EFFECTIVE OUTPUT AND HOLE PROCESSING QUALITY BASED ON CUTTING PROCESS DYNAMICS ESTIMATION

A.S. Pyatykh

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

ABSTRACT. The purpose of the work is to improve the dynamic stability and productivity of hole processing. **METHODS.** The scientific fundamentals of the technology of mechanical engineering and material cutting, modeling and active experiment form the theoretical basis of research. The experimental data are obtained with the help of measuring means including the program complex based on the Taylor Hobson Form Talysurf i200 profilometer, Carl Zeiss CONTURA G2 coordinate measuring machine, Zoller Genius 3 geometric parameter monitoring device, Kistler 9129AA and 9253B23

¹Пятых Алексей Сергеевич, инженер-исследователь научно-исследовательской части, e-mail: alexess@istu.edu
Aleksey S. Pyatykh, Research Engineer of the Research department, e-mail: alexess@istu.edu



dynamometer complexes, CutPro hardware- software complex and others. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The developed mathematical model of the drilling process allows to solve the task of improving productivity, surface quality and accuracy of holes in the parts made of aluminum alloys by choosing optimal cutting conditions on the basis of the dynamic stability diagram. The created mathematical model of hole accuracy dependence on the length of the twist drill working part and the cutting modes enables the prediction of the hole accuracy as early as at the design stage of the technological process. The calculated modal parameters of instrumental adjustment for a solid carbide drill can be used in plotting drilling process stability diagrams. The developed procedure for studying clamping chucks allows to evaluate their effect on the dynamic stability of the drilling process as well as to estimate their effect on the quality and accuracy of produced holes. **CONCLUSIONS.** Having considered the results of experimental studies, it was proposed to use a hydroplastic chuck when drilling holes with the required accuracy in accordance with H7-H8. The experimentally determined coefficients of the cutting force model allow to take into account the physicomachanical properties of aluminum alloys V95pchT2, 1933T2, 1163T when modeling the drilling process both in special software products and using high-level programming languages.

Keywords: hole accuracy, drilling simulation, regression equation, cutting modes, cutting dynamics

Information about the article. Received June 06, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Pyatykh A.S. Improving effective output and hole processing quality based on cutting process dynamics estimation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 67–81. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-67-81 (In Russian)

Введение

Сверление является наиболее распространенным видом механической обработки материалов резанием и одним из важных процессов в аэрокосмической области. Например, при изготовлении широкофюзеляжного самолета обрабатывается около 50000 отверстий [1]. Сверление часто является одной из последних выполняемых операций. Это означает, что оно осуществляется, когда деталь имеет высокую добавочную стоимость. Поэтому экономическая стоимость устранения дефектов сверления может быть непомерно высокой. Чтобы повысить качество отверстий, необходимо изучение механизмов и условий, которые вызывают появление дефектов. Большое значение имеет то, что производительность процесса может быть увеличена за счет уменьшения геометрических дефектов в деталях и издержек, связанных с дополнительными операциями, исправляющими дефекты отверстий [2–4].

Снижение риска образования геометрических дефектов возможно за счет использования высокопроизводительных сверл, зажимных патронов, обеспечивающих высокую точность и усилие закрепления, станков с высокой жесткостью и точностью, режимов резания, максимально учитывающих свойства обрабатываемого ма-

териала и динамические характеристики технологической системы.

Анализ публикаций на эту тему показал, что для решения проблем обеспечения наибольшей производительности процесса сверления и наилучшего качества поверхности в настоящее время успешно применяются методы математического моделирования [5–9]. Результаты исследований, приведенные в работах [10–12], позволяют сделать вывод, что наилучшие показатели при моделировании процессов резания достигаются с помощью языков программирования высокого уровня. В качестве входных данных используются параметры резания – угол среза, коэффициент трения, напряжение сдвига, которые в свою очередь зависят от механических свойств обрабатываемого материала, геометрии режущей кромки, скорости резания и подачи. При этом необходимо такое математическое описание параметров резания, которое в последующем можно использовать при построении алгоритмов и написании программ на языках программирования высокого уровня. Параметры резания должны быть получены путем проведения опытных работ с приемлемой трудоемкостью.

Исходя из вышеизложенного, была



сформулирована цель работы: повысить производительность и качество обработки точных отверстий сверлением для условий современного высокотехнологичного производства, на основе оценки динамики процесса резания.

Для достижения цели необходимо:

- разработать математическую модель зависимости точности отверстий от длины рабочей части спирального сверла;
- разработать математическую модель процесса сверления, учитывающую динамические характеристики инструмен-

тальной наладки, жесткость технологической системы и геометрические параметры режущего инструмента для расчета диаграммы динамической устойчивости;

– на основе экспериментальных данных численно определить коэффициенты модели сил резания, характеризующие физические свойства высокопрочных алюминиевых сплавов;

– используя средства модального анализа определить динамические характеристики инструментальной наладки на базе цельного твердосплавного сверла.

Экспериментальные исследования по определению модели зависимости точности отверстия от технологических параметров процесса сверления

Целью данного эксперимента является определение реальной зависимости отклонения диаметра отверстия Δd от серии сверла, L_p , скорости резания, V_c , и величины подачи, f_n .

Полагаем, что математическая модель отклонения диаметра отверстия Δd может быть представлена уравнением

$$\Delta d = C \cdot L_p^{a_1} \cdot V_c^{a_2} \cdot f_n^{a_3}, \quad (1)$$

где C , a_1 , a_2 , a_3 – параметры исследуемой модели.

Прологарифмируем выражение (1):

$$\ln \Delta d = \ln C + a_1 \ln L_p + a_2 \ln V_c + a_3 \ln f_n. \quad (2)$$

Переименуем выражение следующим образом:

$y_1 = b_0 x_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3$,
где $y_1 = \ln \Delta d$; x_0 – фиктивная переменная; x_1 , x_2 , x_3 – кодированные значения факторов; b_0 , b_1 , b_2 , b_3 – постоянные коэффициенты.

Кодирование переменных осуществляется по следующим соотношениям:

$$x_1 = \frac{2(\ln L_p + \ln L_{pmax})}{\ln L_{pmax} - \ln L_{pmin}} + 1;$$

$$x_2 = \frac{2(\ln V_c + \ln V_{cmax})}{\ln V_{cmax} - \ln V_{cmin}} + 1;$$

$$x_3 = \frac{2(\ln f_n + \ln f_{nmax})}{\ln f_{nmax} - \ln f_{nmin}} + 1.$$

Верхние (L_{pmax} , V_{cmax} , f_{nmax}), нижние (L_{pmin} , V_{cmin} , f_{nmin}) и основные (L_{p0} , V_{c0} , f_{n0}) уровни представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение уровней факторов эксперимента

Table 1

Values of experiment factor levels

Фактор	Код	Интервал	Натуральное значение фактора		
			Верхний уровень (+1)	Основной уровень (0)	Нижний уровень (-1)
L_p , мм	x_1	20	70	50	30
V_c , м/мин	x_2	50	225	175	125
f_n , мм/об.	x_3	0,1	0,4	0,3	0,2



Планирование эксперимента осуществляется согласно предложенному Боксом и Бенкиным некомпозиционному плану [13], который представляет собой определенные выборки строк из полного факторного эксперимента типа 3^k , предусматривающего проведение 15 опытов. Матрица плана изображена в табл. 2.

Вектор коэффициентов определяется по формуле

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y.$$

Дисперсии $S^2(b_j)$ коэффициентов регрессии находятся из выражения:

$$S^2(b_j) = c_{jj} S_y^2, \quad (3)$$

где c_{jj} – диагональные элементы матрицы XX^{-1} ; S_y^2 – дисперсия эмпирической регрессии.

Среднее значение и дисперсия опыта определяются вектором опытов в центре

плана:

– среднее значение:

$$y := \frac{\sum_{i=0}^2 Y_{u_i}}{3},$$

где Y_u – вектор значений функции отклика в центре плана;

– дисперсия:

$$S_y^2 := \frac{\sum_{i=0}^2 (Y_{u_i} - y)^2}{2}.$$

Статическая значимость коэффициентов уравнения регрессии по критерию Стьюдента определяется с помощью программы Statistica 6.0, результаты расчетов представлены в табл. 3, где L и K – линейные и квадратичные коэффициенты соответственно. Коэффициенты, абсолютное значение которых больше 0,05, являются достоверными и могут быть использованы для дальнейших преобразований.

Таблица 2

Матрица результатов планирования эксперимента

Table 2

Matrix of experiment planning results

Номер опыта	X_1		X_2		X_3		Δd , мм
	код	L_p , мм	код	V_c , м/мин	код	f_n , мм/об.	
1	-1	30	-1	125	0	0,3	0,013
2	1	70	1	225	0	0,3	0,030
3	-1	30	1	225	0	0,3	0,009
4	1	70	1	225	1	0,4	0,028
5	-1	30	0	175	-1	0,2	0,008
6	1	70	0	175	-1	0,2	0,020
7	-1	30	0	175	1	0,4	0,012
8	1	70	0	175	1	0,4	0,024
9	0	50	-1	125	-1	0,2	0,021
10	0	50	1	225	-1	0,2	0,016
11	0	50	-1	125	1	0,4	0,024
12	0	50	1	225	1	0,4	0,021
13	0	50	0	175	0	0,3	0,018
14	0	50	0	175	0	0,3	0,020
15	0	50	0	175	0	0,3	0,018



Таблица 3

Регрессионные коэффициенты

Table 3

Regression coefficients

Фактор	Регрессионный коэффициент	Стандартная ошибка	<i>t</i> -критерий	<i>p</i> -уровень	Доверительный предел	
					-95%	+95%
Св. член	-3,98226	0,053067	-75,0422	0,000000	-4,10464	-3,85989
L_p (L)	0,44758	0,032497	13,7732	0,000001	0,37265	0,52252
L_p (K)	-0,18849	0,047834	-3,9406	0,004292	-0,29880	-0,07819
V_c (L)	-0,10527	0,032497	-3,2395	0,011887	-0,18021	-0,03034
V_c (K)	0,13690	0,047834	2,8619	0,021090	0,02695	0,24720
f_n (L)	0,12416	0,032497	3,8206	0,005086	0,04922	0,19909
f_n (K)	-0,5247	0,047834	-1,0968	0,304635	-0,16277	0,05784

Таким образом, регрессионное уравнение зависимости отклонения диаметра от номинального будет иметь вид:

$$\Delta d = L_p^{4,236-1,0435 \cdot \ln(L_p)} \cdot V_c^{-16,481+1,573 \cdot \ln(V_c)} \cdot f_n^{0,360} \cdot e^{35,588}. \quad (4)$$

Адекватность модели проверяется по критерию Фишера. Для этого вектор расчетных значений подставляется в полученную ранее формулу.

Дисперсия воспроизводимости определяется по формуле

$$S_E^2 = \frac{\sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_j)^2}{N(n-1)},$$

где N – число опытов; $\bar{y}_j$ – математическое ожидание в j -м опыте.

Число степеней свободы дисперсии воспроизводимости определяется как сумма чисел степеней свободы дисперсий опытов:

$$f_E = \sum_{j=1}^N (n_j - 1).$$

Таким образом, при числе степеней свободы дисперсии воспроизводимости, f_E , равном 2, дисперсия воспроизводимости равна:

$$S_E^2 = 1,333 \cdot 10^{-6}.$$

Число степеней свободы дисперсии

адекватности определяется как разность числа опытов N и числа постоянных коэффициентов в уравнении регрессии m :

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - f(x_j))^2}{N-m}. \quad (5)$$

Данные для расчета представлены в табл. 4.

Исходя из данных, представленных в табл. 4, дисперсия адекватности, определяемая по формуле (5), будет равна:

$$S_{ад}^2 = 3,481 \cdot 10^{-6}.$$

Дисперсии адекватности и воспроизводимости будут однородными, если выполняется условие

$$F < F_{табл},$$

где $F = \frac{S_{ад}^2}{S_E^2}$; $F_{табл}$ – табличное значение критерия Фишера.

Согласно [13], табличное значение критерия Фишера для данного случая составляет 19,38.

Таким образом, дисперсии адекватности и воспроизводимости однородны, и с доверительной вероятностью $P = 0,95$ можно утверждать, что составленное уравнение регрессии (4) адекватно. Разброс экспериментальных значений функции отклика относительно ее расчетных значений равен среднему разбросу результатов повторных измерений в каждом опыте отно-



сительно своих математических ожиданий [14].

Графики поверхности отклонения от диаметра в зависимости от параметров

режимов обработки и длины рабочей части спирального сверла представлены на рис. 1.

Таблица 4

Расчет дисперсии адекватности

Table 4

Calculation of adequacy variance

Номер опыта	y_{ij}	$\bar{y}_j$	$(y_i - \bar{y}_j)$	$(y_i - \bar{y}_j)^2$
1	0,013	0,013	0	0
2	0,03	0,032	-0,002	0,000004
3	0,009	0,01	-0,001	0,000001
4	0,028	0,025	0,003	0,000009
5	0,008	0,009	-0,001	0,000001
6	0,02	0,021	-0,001	0,000001
7	0,012	0,011	0,001	0,000001
8	0,024	0,027	-0,003	0,000009
9	0,021	0,023	-0,002	0,000004
10	0,016	0,018	-0,002	0,000004
11	0,024	0,029	-0,005	0,000025
12	0,021	0,024	-0,003	0,000009
13	0,018	0,02	-0,002	0,000004
14	0,02	0,02	0	0
15	0,018	0,02	-0,002	0,000004

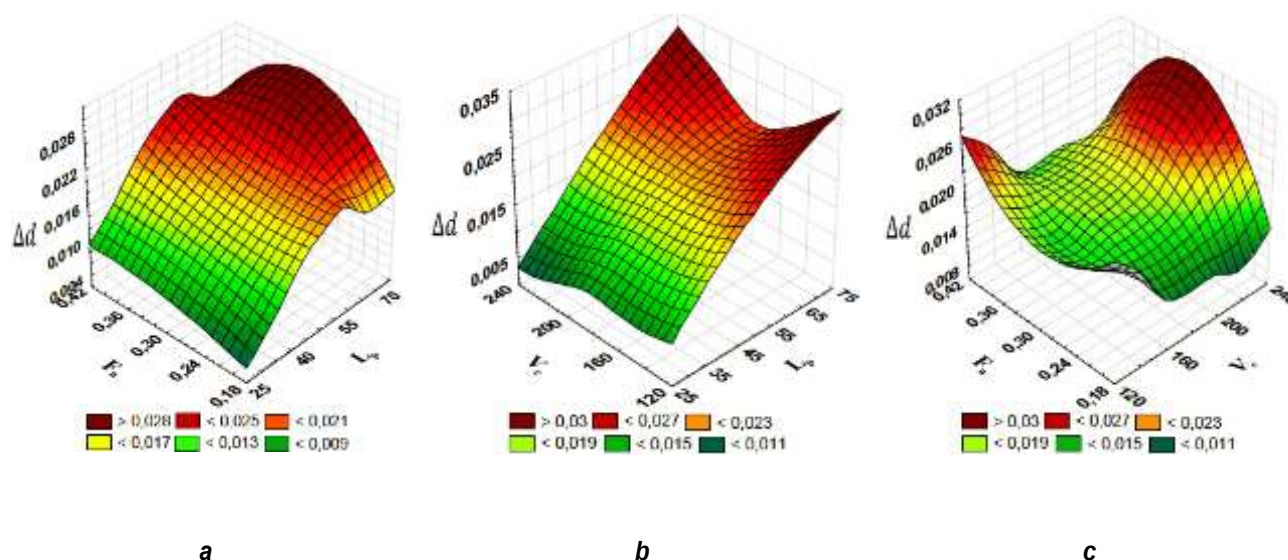


Рис. 1. Зависимости отклонения диаметра от заданного:
а – от подачи инструмента f_n и длины рабочей части L_p ;
б – от скорости резания V_c и длины рабочей части L_p ;
с – от подачи инструмента f_n и скорости резания V_c
Fig. 1. Dependences of diameter deviation from the specified one:
а – from the tool feed f_n and working part length L_p ;
б – from the cutting speed V_c and working part length L_p ;
с – from the tool feed f_n and cutting speed V_c



На основе полученных данных можно сделать вывод, что отклонение от диаметра значительным образом зависит от длины рабочей части спирального сверла. Повышение подачи инструмента ведет к

увеличению отклонения от диаметра. При изменении скорости резания существуют такие значения, при которых отклонение от диаметра является минимальным.

Методика и условия проведения эксперимента

Теоретические аспекты разработки математической модели процесса сверления на основании анализа исследований [5, 6, 8, 15–17] представлены в работах [18, 19]. В данном разделе приведены экспериментальные исследования адекватности разработанной математической модели.

Для сверления отверстий используется спиральное твердосплавное сверло диаметром 9 мм. Данное сверло было измерено на устройстве для настройки и контроля инструмента вне станка. В табл. 5 приведены технические параметры сверла R840-0900-50-A1A и технические условия

для сверла повышенной точности A1 согласно ГОСТ 2034-80.

Для закрепления сверла использовался гидропластовый патрон. Данный патрон исследовался в работе [20] и показал наилучшие результаты для сверления отверстий.

Расчет режимов резания выполняется на основании данных диаграммы динамической устойчивости, для построения которой была разработана математическая модель (6). Экспериментальным путем определены коэффициенты модели сил резания для обрабатываемого материала В95пчТ2 [21–23].

Таблица 5

Параметры режущего инструмента

Table 5

Cutting tool parameters

Контролируемые параметры	Технические условия (ГОСТ 2034-80 (для сверла точности A1))	Измеренные параметры для сверла R840-0900-50-A1A
Поле допуска диаметра режущей части сверла, измеренное в начале рабочей части	<i>h8</i>	<i>m7</i>
Точность	<i>IT10-13</i>	<i>IT8-10</i>
Шероховатость, мкм:		
задних поверхностей режущей части	3,2	1,58
направляющих ленточек R_z	3,2	2,12
поверхности хвостовика R_a	0,8	0,23
поверхностей канавок R_z	6,3	2,96
Допуск осевого биения	0,07	0,01
Допуск радиального биения	0,12	0,02
Допуск симметричности поперечной кромки относительно оси рабочей части сверла	0,04	0,01
Предельные отклонения угла при вершине и заднего угла	не более ± 3	не более -1,5



Частота вращения шпинделя n определяется из выражения:

$$n = \frac{\omega_n}{\frac{1}{\pi} \arctg\left(\frac{b\omega_n}{k-m\omega_n^2}\right)} + N, \quad (6)$$

где ω_n – частота собственных колебаний системы, Гц; k – коэффициент демпфирования, %; m – модальная масса, кг; $n = 1, 2, 3, \dots$

Жесткость резания g определяется как

$$g = \frac{(k-m\omega_n^2)^2 + (b\omega_n)^2}{2(k-m\omega_n^2)}.$$

Результаты моделирования в программе Matlab 2014b представлены на рис. 2. Кружками отмечены обороты шпинделя, на которых будет проводиться сверление отверстий.

Согласно данным инструментального каталога производителя режущего ин-

струмента Sandvik, для сверления отверстий в алюминиевом сплаве N1.3. C.UT (аналог В95пчТ2) скорость резания должна составлять от 120 до 230 м/мин, подача сверла – от 0,2 до 0,4 мм/об. Таким образом был составлен план эксперимента, который предполагает просверливание глухих отверстий на режимах, указанных в табл. 6.

Заготовка представляла собой блок размером 400×250×50 мм и закреплялась на стационарном динамометре Kistler, который в свою очередь был установлен на столе станка HSC 75 linear. Данные собирались с помощью блока АЦП 5028 и в дальнейшем обрабатывались в программном продукте DynoWare. Также в процессе эксперимента исследовались вибрации. Для этого использовался трехканальный акселерометр с магнитным креплением на шпинделе станка.

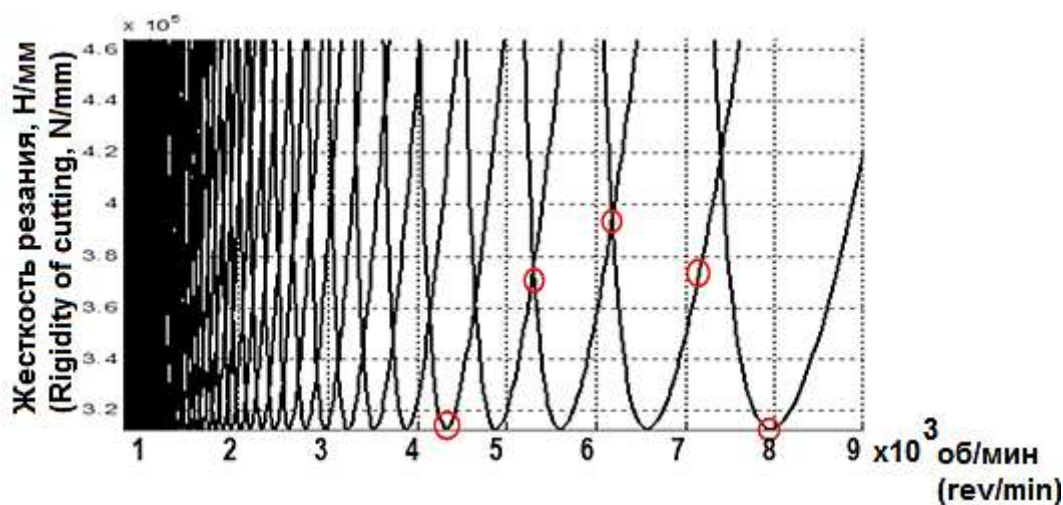


Рис. 2. Диаграмма динамической устойчивости процесса сверления
Fig. 2. Drilling process dynamic stability diagram

Таблица 6

План эксперимента

Table 6

Experiment plan

Изменяемый параметр	f_n , мм/об.	V_c , м/мин	n , об./мин	a_p , мм	Охлаждение	V_{fs} , мм/мин
Значение	0,2–0,4	125–225	4421–7958	10–30	СОЖ/Воздух	1200–90000
Шаг	0,05	25	885	5	–	–



Преобразование сигнала осуществлялось с помощью платы National Instruments. Запись сигнала и обработка данных осуществлялись в программном комплексе LabView, в котором для этих целей была разработана программа.

Для оценки влияния параметров обработки на силы резания были построены графики зависимости сил резания от величины подачи инструмента (рис. 3, а) и от скорости резания (рис. 3, б).

График, представленный на рис. 3, а, подтверждает, что увеличение подачи инструмента влечет за собой пропорциональное увеличение сил резания, направленной вдоль оси сверла Z. В отношении сил резания, направленных вдоль осей X и Y, тенденция сохраняется.

В отличие от линейной зависимости сил резания от подачи инструмента зависимость сил резания от скорости резания имеет более сложную форму. Существует скорость резания, которая является оптимальной в определенных технологических условиях. При сравнении графика, представленного на рис. 3, б, с диаграммой областей стабильного резания, отчетливо видно, что при сверлении отверстий на скорости резания, попадающей в области стабильности, силы резания являются минимальными. При сверлении отверстий на скоростях резания, попадающих в зоны неустойчивости, силы резания являются максимальными. Сверление отверстий на ско-

ростях резания, находящихся на границах устойчивости, является неочевидным.

Таким образом, согласно зависимостям, представленным на рис. 3, б, обработка отверстий на скорости резания $V_c=175$ м/мин является наиболее предпочтительной с точки зрения возникновения деформационных сил резания.

Для оценки влияния режимов резания на процесс обработки построены графики зависимости среднеквадратичного значения (СКЗ) виброускорений от подачи инструмента (рис. 4, а) и скорости резания (рис. 4, б).

Согласно графику, представленному на рис. 4, а, СКЗ виброускорения уменьшается при увеличении подачи инструмента до определенного значения и после начинает увеличиваться. С точки зрения уровня вибраций системы, подача инструмента равная 0,3 мм/об. является оптимальной.

Согласно данным графика, представленного на рис. 4, б, скорость резания при сверлении оказывает значительное влияние на уровень вибраций системы. Увеличение скорости резания до определенных значений (150, 175 м/мин) благоприятно сказывается на протекании процесса сверления: вибрации в технологической системе минимальные. Увеличение скорости резания до 200 м/мин вызывает увеличение уровня вибраций, что отражено на графике.

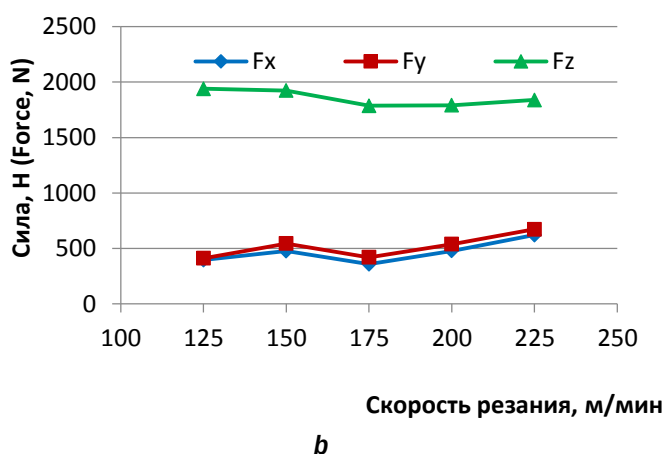
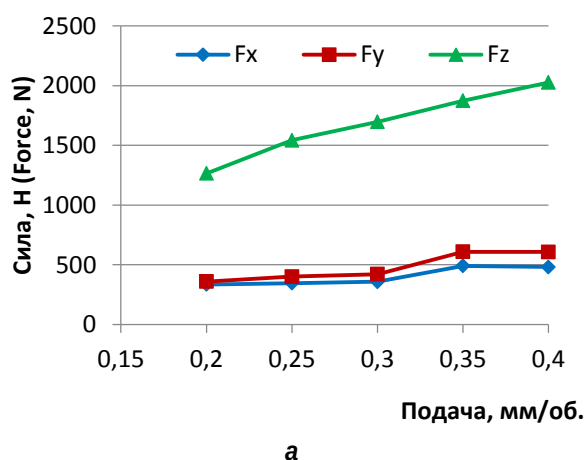


Рис. 3. Графики зависимости сил резания от подачи инструмента (а) и скорости резания (б)
Fig. 3. Plots of cutting forces dependence on the tool feed (a) and the cutting speed (b)

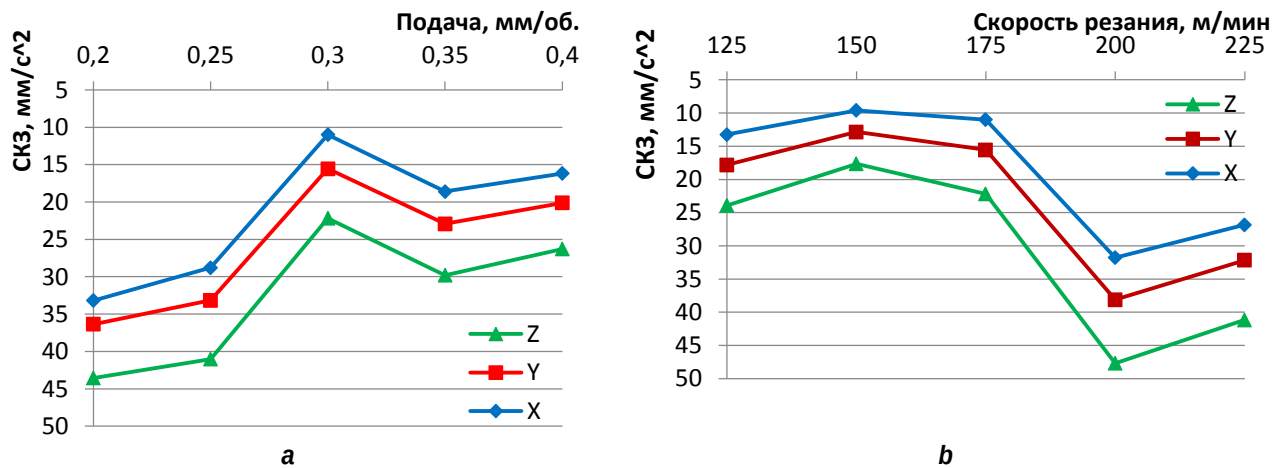


Рис. 4. Графики изменения СКЗ виброускорения по трем осям в зависимости от подачи инструмента (а) и скорости резания (б)
Fig. 4. Plots of vibration acceleration RMS variation by three axes depending on the tool feed (a) and the cutting speed (b)

Контроль высоты микронеровностей поверхностей отверстий проводился с помощью контактного профилометра Taylor Hobson TalySurf i200 с алмазным наконечником. В качестве контролируемых параметров по ГОСТ 25142-82 выбраны R_a и R_z как наиболее универсальные и используемые в производстве. Для программного анализа полученной профилограммы использовался фильтр Гаусса, ширина полосы пропускания – 300:1 (по ISO).

На основании полученных данных были построены графики зависимости шероховатости поверхности отверстия от скорости резания (рис. 5, а) и скорости вывода инструмента (рис. 5, б).

Скорость вывода сверла из отверстия (см. рис. 5, б) оказывает непосредственное влияние на формирование качества поверхности отверстия. Для сохранения качества поверхности требуется выводить сверло из отверстия на скорости, равной скорости подачи инструмента.

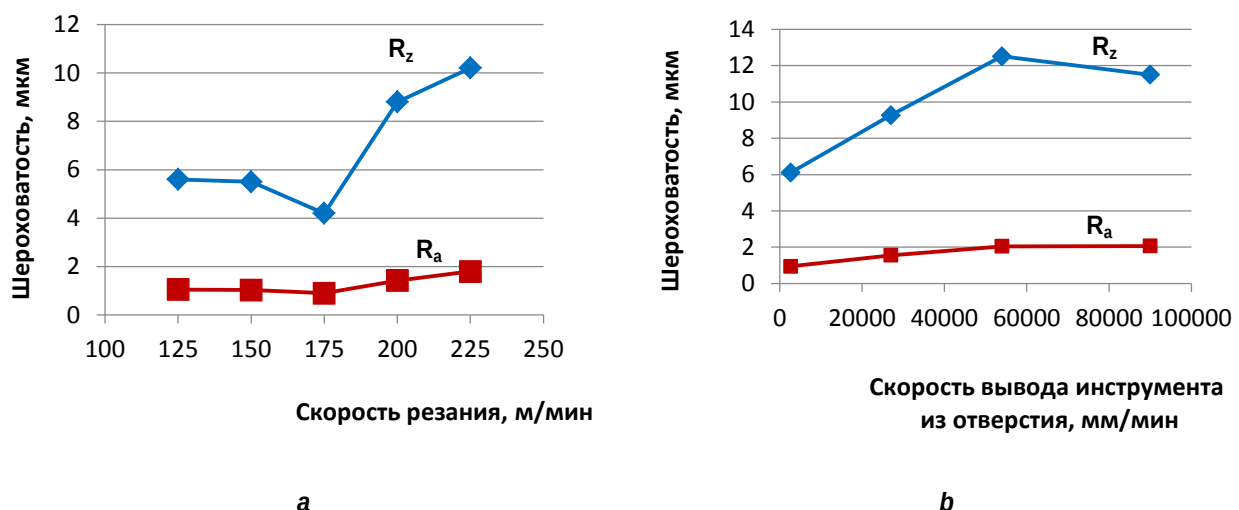


Рис. 5. Графики зависимости шероховатости поверхности отверстия от скорости резания (а) и скорости вывода инструмента из отверстия (б)
Fig. 5. Plots of hole surface roughness dependence on the cutting speed (a) and the speed of tool withdrawal from the hole (b)



Проведенные экспериментальные исследования показали, что параметры обработки оказывают большое влияние на шероховатость поверхности. При высокой скорости резания и высоких подачах наблюдается ухудшение качества поверхности. При высоких скоростях обработки может происходить разрыхление материала, связанное с высокой температурой в зоне резания. Также негативное влияние на шероховатость поверхности оказывает вибрация инструмента (сверла). С увеличением скорости подачи увеличивается скорость удаления стружки, что тоже может привести к плохой поверхности отверстия.

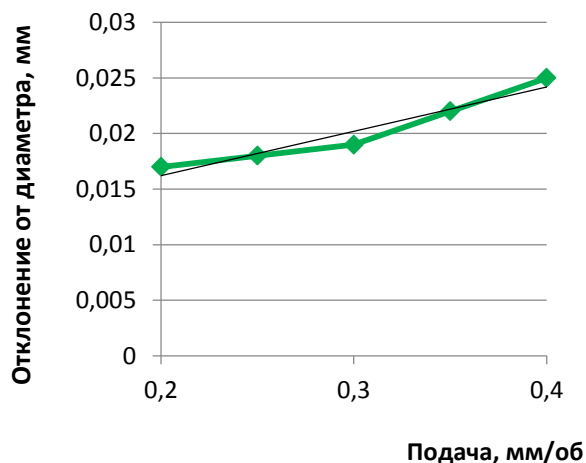
Контроль точности отверстий проводился с помощью координатно-измерительной машины (КИМ) Carl Zeiss CONTURA G2. На рис. 6 показано влияние режимов резания на диаметральный размер просверленного отверстия.

При увеличении подачи инструмента происходит отклонение диаметра отверстия от заданного в большую сторону. Это связано, прежде всего, с относительно малой жесткостью спирального сверла и возрастающей силой, действующей вдоль оси инструмента.

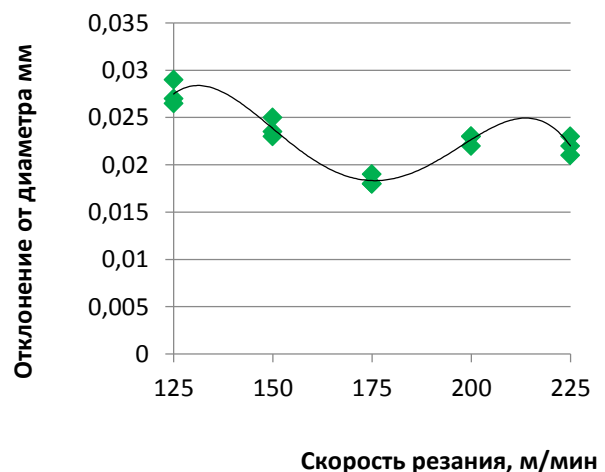
На графике видно (рис. 6, *b*), что с увеличением скорости резания происходит снижение отклонения от заданного диаметра отверстия. С увеличением частоты вращения шпинделя устойчивость системы возрастает.

Устойчивость процесса резания при сверлении отверстий сверлом R840–0900–50A1A для различных комбинаций частот вращения шпинделя была определена на основании измеренных сил, данных с акселерометра при резании с учетом качества поверхности на дне отверстия. Данные виброускорения, полученные с помощью трехканального акселерометра, раскладываются в ряд Фурье. Для каждой собственной частоты колебаний инструментальной наладки анализируются гармоники и их амплитуда.

На рис. 7 показана обработанная поверхность дна отверстия, на которой видны следы вибраций с частотой поперечной моды. При частоте 6189 об./мин (175 м/мин) частотные спектры сил резания и частотные спектры колебаний не показывают никаких пиков около поперечной моды, и также около крутильно-осевой моды. Следов вибрации на обработанной поверхности также не наблюдается.



a



b

Рис. 6. Графики зависимости отклонения диаметра отверстий от подачи инструмента (а) и скорости резания (б)

Fig. 6. Plots of hole diameter deviation dependence on the tool feed (a) and the cutting speed (b)

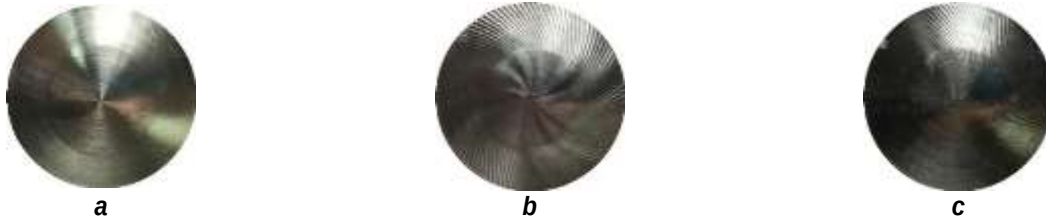


Рис. 7. Торцовая поверхность отверстий при сверлении:
а – в зоне динамической устойчивости; б – на границе динамической устойчивости;
с – в зоне динамической неустойчивости

Fig. 7. End face of holes under drilling: a – in the zone of dynamic stability;
b – on the boundary of dynamic stability; c – in the zone of dynamic instability

На рис. 8 приведены частотные спектры сигналов виброускорения, полученные при сверлении отверстий на разных частотах шпинделя, подача инструмента f_n составляла 0,3 мм/об., глубина отверстий $a_p = 15$ мм. При частоте вращения шпинделя 7073 и 7957 об./мин (соответственно 200 и 225 м/мин) частотный спектр колебаний показывает доминирующий пик на частоте поперечной моды. Пики около собственной частоты поперечной моды вместе с увеличением амплитуд колебаний и сил показы-

вают поперечную неустойчивость.

Полученные результаты в ходе экспериментальных исследований успешно коррелируются с результатами математического моделирования, представленными на рис. 2. При сверлении на скорости 175 м/мин (6189 об/мин) и подачи инструмента 0,3 мм/об поверхность отверстий соответствует 7 качеству. При этом отклонение диаметра отверстия от номинального не превышает 0,020 мм (табл. 7).

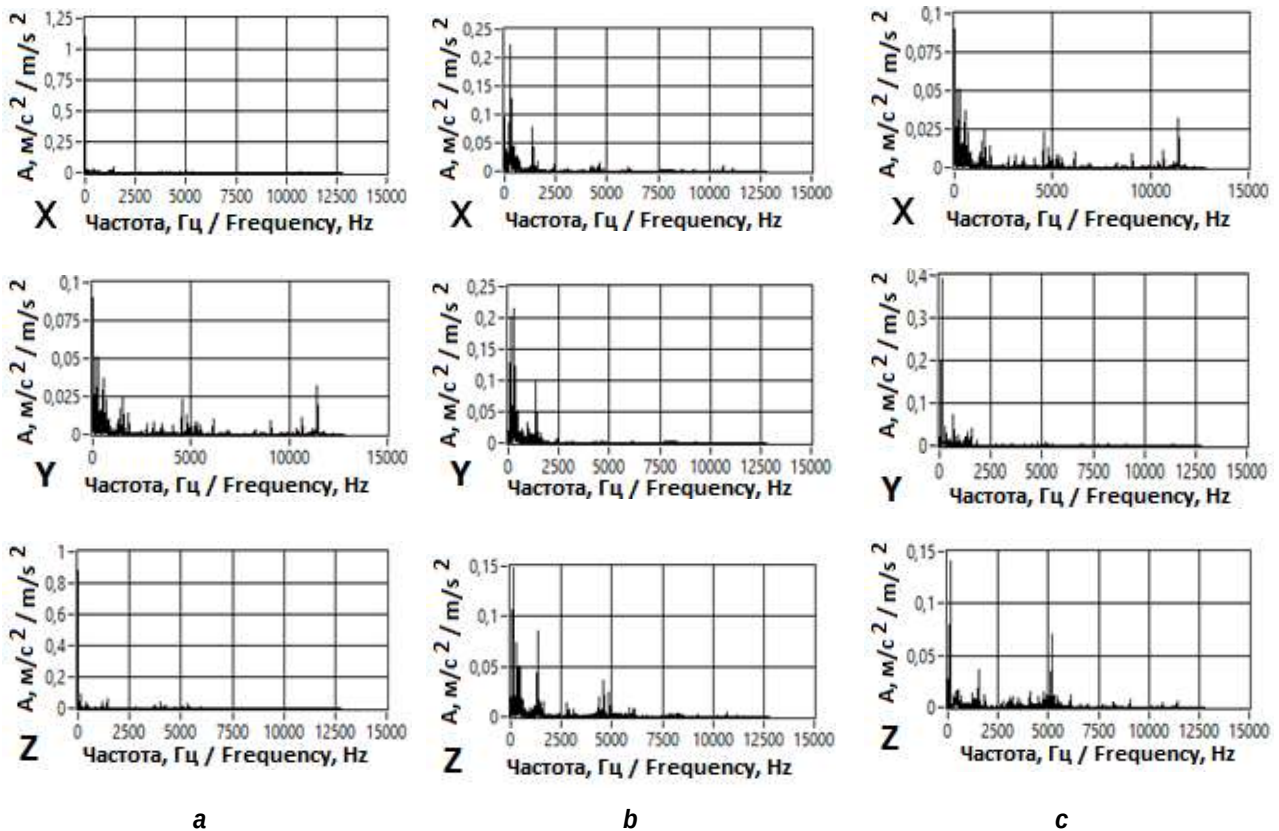


Рис. 8. Частотные спектры сигналов виброускорения:
а – $n = 6189$ об./мин, б – $n = 7073$ об./мин, с – $n = 7073$ об./мин
Fig. 8. Frequency spectra of vibration acceleration signals:
a – $n = 6189$ rpm, б – $n = 7073$ rpm, с – $n = 7957$ rpm



Таблица 7

Оптимальные режимы резания для сверления отверстий в алюминиевом сплаве
В95пчТ2 сверлом R840–0900–50 A1A

Table 7

Optimal cutting modes for drilling holes in aluminum alloy V95pchT2 with
a drill R840-0900-50 A1A

Скорость резания, V_c , мм/мин	Подача инструмента, f_n , мм/об.	Скорость вывода инструмента из отверстия, V_o , мм/мин	Охлаждающая среда	Шерохова- тость, R_a , мкм	Отклонение от диаметра, мм
175	0,3	2700	СОЖ	0,45–0,55	0,018–0,020

Основные результаты и выводы

В ходе выполнения работы были получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработана математическая модель, отражающая влияние режимов резания и длины рабочей части спирального сверла на точность отверстий в деталях из алюминиевых сплавов.

2. Выполнено моделирование диаграммы динамической устойчивости процесса сверления спиральным сверлом диаметром 9 мм средней серии. Экспериментально подтверждено соответствие теоретических результатов практическим. Установлено влияние скорости вывода инструмента на сохранение качества поверхности отверстия. При выводе инструмента из отверстия на скорости, равной скорости подачи инструмента, качество поверхности отверстия является наилучшим. По результатам теоретических и экспериментальных исследований решена задача повышения производительности процесса резания, качества поверхности и точности отверстий в деталях из алюминиевых сплавов путем выбора оптимальных режимов резания на основе диаграммы динамической устойчивости.

3. Получены коэффициенты модели сил резания для авиационных алюминиевых сплавов. Данные коэффициенты универсальны для моделирования процесса сверления и могут применяться как в специальных программных продуктах, моделирование в которых основано на использовании физико-механических свойств обрабатываемого ма-

териала, так и в комплексах с использованием языков программирования высокого уровня.

4. Определены модальные параметры инструментальной наладки на базе цельного твердосплавного сверла. Данные параметры позволяют учесть динамические свойства инструментальной наладки при расчете областей стабильного резания.

5. Предложена методика, позволяющая оценить влияние зажимного патрона на динамическую устойчивость процесса сверления, на качество и точность полученных отверстий. По результатам экспериментальных исследований предложено использовать гидропластовый зажимной патрон при сверлении отверстий с требуемой точностью до IT7-8. При этом сверление должно осуществляться на станке – обрабатывающем центре с ЧПУ (фрезерный или токарно-фрезерный с фрезерным шпинделем) с бесступенчатым управлением частотой вращения шпинделя. Радиальное биение шпинделя не должно превышать: измеренное в непосредственной близости к торцу шпинделя – 0,005 мм, измеренное на расстоянии 300 мм от торца – 0,015 мм. Эти требования позволяют обеспечить конусы шпинделя (ISO, BT, HSK, Capto), выполненные по стандартам ISO 7388 (ГОСТ 25827-2014), ISO 12164 (ГОСТ Р ИСО 12164) или ISO 26623.

Представленные результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России 1.7686.2017/7.8.



Библиографический список

1. Jiménez A., Arizmendi M., Cumbicus W.E. Model for the prediction of low-frequency lateral vibrations in drilling process with pilot hole // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 96. P. 1971–1990. DOI: 10.1007/s00170-018-1671-0
2. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Современные методы оптимизации высокопроизводительного фрезерования // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2013. Т. 15. № 6-2. С. 476–479.
3. Савилов А.В., Пятых А.С. Влияние вибраций на точность и качество поверхности отверстий при сверлении // *Вестник ИрГТУ*. 2013. № 12 (83). С. 103–111.
4. Савилов А.В., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Оптимизация процессов механообработки на основе модального и динамометрического анализа // *Наука и технологии в промышленности*. 2013. № 1-2. С. 42–46.
5. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 89. P. 208–220. DOI:10.1016/j.ijmachtools.2014.11.012
6. Altintas Y. *Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations and CNC Design*. Cambridge University Press. 2012. 366 p.
7. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005. Vol. 99. P. 1271–1281.
8. Roukema J.C., Altintas Y. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007. Vol. 47 (9). P. 1455–1473. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005
9. Zhou Y., Yang W., Zhou Y., Xu Z., Shi X. Consistency evaluation of hole series surface quality using vibration signal // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017. Vol. 92. Issue 1-4. P. 1069–1079. DOI: 10.1007/s00170-017-0184-6
10. Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: working surface description approach // *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2012. No. 6. P. 158–175. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-269
11. Voronov S.A., Kiselev I.A. Cutting process modelling geometric algorithm 3MZBL: Algorithm of surface modification and instantaneous chip thickness determination // *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2012. No. 6. P. 70–83. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-261
12. Voronov S.A., Kiselev I.A., Arshinov S.V. Dynamics' numerical simulation application procedure of multi-axis die-milling at process design // *Engineering Journal: Science and Innovation*. 2012. No. 6. P. 50–66. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-6-260
13. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.
14. Регрессионный анализ результатов однофакторного эксперимента [Электронный ресурс]. URL: http://libraryno.ru/2-6-regressionnyy-analiz-rezul-tatov-odnofaktornogo-eksperimenta-osn_plan_exp/ (03.05.2018).
15. Орликов М.Л. Динамика станков. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Выща шк., 1989. 272 с.
16. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
17. Армарего И.Дж.А., Браун Р.Х. Обработка металлов резанием / пер. с англ. В.А. Пастухова. М.: Машиностроение, 1977. 325 с.
18. Пятых А.С. Математическая модель геометрии режущей части спирального сверла // *Авиамашиностроение и транспорт Сибири: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф.* (Иркутск, 12–15 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. С. 232–236.
19. Пятых А.С. Моделирование динамической устойчивости процесса сверления // *Механика XXI века: материалы XVI Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием* (Братск, 17–18 мая 2017 г.) Братск: Изд-во БрГУ, 2017. № 16. С. 133–137.
20. Пятых А.С. Исследование зажимных патронов для сверления точных отверстий // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 4 (32). С. 70–74. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-4-70-74
21. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процессов механообработки // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2015. Т. 17. № 2. С. 211–216.
22. Пятых А.С., Савилов А.В. Определение коэффициентов сил резания для моделирования процесса сверления // *Системы. Методы. Технологии*. 2016. № 2 (30). С. 69–73. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-69-73
23. Серебrenникова А.Г., Пятых А.С., Тимофеев С.А. Исследование зависимости сил резания от геометрических параметров токарного резца // *Авиамашиностроение и транспорт Сибири: материалы IX Всерос. науч.-практ. конф.* (Иркутск, 12–15 апреля 2017 г.). Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2017. С. 241–246.

References

1. Jiménez A., Arizmendi M., Cumbicus W.E. Model for the prediction of low-frequency lateral vibrations in drilling process with pilot hole // *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018. Vol. 96. P. 1971–1990. DOI: 10.1007/s00170-018-1671-0
2. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. The modern methods of optimization the high productive milling. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2013, vol. 15, no. 6-2, pp. 476–479. (In Russian)
3. Savilov A.V., Pyatykh A.S. Vibration effect on accuracy and quality of hole surface under drilling. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2013, no. 12 (83), pp. 103–111. (In Russian)
4. Savilov A.V., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. Machining



processes optimization based on modal and dynamometric analysis. *Nauka i tekhnologii v promyshlennosti* [Science and Technology in Industry]. 2013, no. 1-2, pp. 42–46. (In Russian)

5. Ahmadi K., Savilov A. Modeling the mechanics and dynamics of arbitrary edge drills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015, vol. 89, pp. 208–220. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2014.11.012

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

7. Pirtini M., Lazoglu I. Forces and hole quality in drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2005, vol. 99, pp. 1271–1281.

8. Roukema J.C., Altintas Y. Generalized modeling of drilling vibrations. Part I: Time domain model of drilling kinematics, dynamics and hole formation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2007, vol. 47 (9), pp. 1455–1473. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.10.005

9. Zhou Y., Yang W., Zhou Y., Xu Z., Shi X. Consistency evaluation of hole series surface quality using vibration signal. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017, vol. 92, issue 1-4, pp. 1069–1079. DOI: 10.1007/s00170-017-0184-6

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

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

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

13. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskii Yu.V. *Planirovaniye eksperimenta pri poiske optimal'nykh uslovii* [Experiment planning when searching for optimal conditions]. Moscow: Nauka Publ., 1976, 280 p. (In Russian)

14. *Regressionnyi analiz rezul'tatov odnofaktornogo eksperimenta* [Regression analysis of one-factor experiment results]. Available at: http://libraryno.ru/2-6-regressionnyy-analiz-rezul-tatov-odnofaktornogo-eksperimenta-osn_plan_exp/ (accessed 3 May 2018).

15. Orlikov M.L. *Dinamika stankov* [Machine tool dynamics].

Kiev: Vyshcha shkola Publ., 1989, 272 p.

16. Kudinov V.A. *Dinamika stankov* [Machine tool dynamics]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1967, 360 p. (In Russian)

17. Armarego I.Dzh.A., Braun R.Kh. *Obrabotka metallov rezaniem* [The machining of metals]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1977, 325 p. (In Russian)

18. Pyatykh A.S. *Matematicheskaya model' geometrii rezhushchei chasti spiral'nogo sverla* [Mathematical model of the twist drill cutting part geometry]. *Materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Proceedings of IX All-Russian scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport of Siberia"]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2017, pp. 232–236. (In Russian)

19. Pyatykh A.S. *Modelirovaniye dinamicheskoi ustoychivosti protsessa sverleniya* [Modeling drilling process dynamic stability]. *Materialy XVI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Mekhaniki XXI veku"* [Proceedings of XVI All-Russian scientific and technical conference with international participation "XXI century mechanics"]. Bratsk: BrGU Publ., 2017, no. 16, pp. 133–137. (In Russian)

20. Pyatykh A.S. Investigation of chucks for drilling precise holes. *Sistemy. Metody. Tekhnologii* [Systems. Methods Technologies]. 2016, no. 4 (32), pp. 70–74. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-4-70-74 (In Russian)

21. Pyatykh A.S., Savilov A.V. The identification cutting force coefficients for simulation of the machining. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk* [Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. 2015, vol. 17, no. 2, pp. 211–216. (In Russian)

22. Pyatykh A.S., Savilov A.V. Determination of cutting force coefficients to simulate the drilling process. *Sistemy. Metody. Tekhnologii*. [Systems. Methods Technologies]. 2016, no. 2 (30), pp. 69–73. DOI: 10.18324/2077-5415-2016-2-69-73 (In Russian)

23. Serebrennikova A.G., Pyatykh A.S., Timofeev S.A. *Issledovanie zavisimosti sil rezaniya ot geometricheskikh parametrov tokarnogo reztsa* [Study of cutting forces dependence on the geometrical parameters of a turning cutter]. *Materialy IX Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Aviamashinostroenie i transport Sibiri"* [Proceedings of IX All-Russian scientific and practical conference "Aircraft Engineering and Transport in Siberia"]. Irkutsk: IRNITU Publ., 2017, pp. 241–246. (In Russian)

Критерии авторства

Пятых А.С. провел исследования, подготовил статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Pyatykh A.S. 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 004.023

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-82-90>

ПРОЦЕДУРА ПОСТРОЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЛОГИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ

© А.М. Дунаев¹

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Создание оптимального логического алгоритма технического диагностирования промышленных преобразователей частоты, основанного на анализе функциональной схемы. **МЕТОДЫ.** Осуществляется формулирование аналитического критерия оптимальности диагностического алгоритма как минимальности средних затрат на определение одного технического состояния объекта диагностирования. Производится алгоритмизация решения задачи нахождения удовлетворяющей сформулированному критерию последовательности выполнения элементарных диагностических проверок над функциональными блоками промышленного преобразователя частоты. Выделяются основные этапы решения задачи, в число которых входят: анализ функциональной схемы диагностируемого устройства на предмет целесообразности выполнения диагностических проверок функциональных блоков в различных ситуациях; выбор блока, подлежащего проверке в первую очередь; определение блочных номенклатур ветвей конфигурации; формирование совокупности возможных последовательностей выполнения элементарных проверок в ветвях конфигурации; выявление последовательностей, характеризующихся минимальными показателями средних затрат на выполнение; синтез конфигураций оптимальных алгоритмов из определенных ранее составных частей. Реализация разработанной процедуры осуществляется на языке программирования высокого уровня Object Pascal средствами интегрированной среды Delphi. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Предложена процедура построения конфигурации оптимального логического алгоритма диагностирования электрооборудования. В рамках программной реализации данной процедуры применительно к такому электрооборудованию, как промышленные преобразователи частоты, создано специализированное приложение «FC_OPTIM». Построено две конфигурации логических алгоритмов диагностирования, удовлетворяющих критерию оптимальности. Одна из полученных конфигураций соответствует МРТ-алгоритму диагностирования преобразователей частоты, который используется при структурировании базы знаний экспертного комплекса для наладки преобразователей частоты «FC3», разработанного автором настоящего исследования. **ВЫВОДЫ.** Создан оптимальный логический алгоритм технического диагностирования промышленных преобразователей частоты, основанный на анализе функциональной схемы.

Ключевые слова: промышленный преобразователь частоты, функциональная схема устройства, элементарная диагностическая проверка, оптимальный алгоритм диагностирования, процедура построения алгоритма диагностирования, средние затраты диагностирования, конфигурация алгоритма диагностирования.

Информация о статье. Дата поступления 14 июня 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Дунаев А.М. Процедура построения оптимального логического алгоритма диагностирования // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 82–90. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-82-90

PROCEDURE OF OPTIMAL LOGICAL DIAGNOSIS ALGORITHM CONSTRUCTION

A.M. Dunaev

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

ABSTRACT. The PURPOSE of the paper is to create an optimal logical algorithm based on functional diagram analysis for the technical diagnosis of industrial frequency converters. **METHODS.** An analytical criterion of diagnostic algorithm optimality is formulated as a minimality of average costs for determining one technical state of the object of diagnosis. An algorithm is developed for the solution of the problem of finding a sequence of elementary diagnostic tests of industrial

¹Дунаев Андрей Михайлович, аспирант, e-mail: west-ma@yandex.ru
Andrey M. Dunaev, Postgraduate student, e-mail: west-ma@yandex.ru



frequency converter functional blocks, which satisfies the formulated criterion. The main stages of solving the problem are identified: the analysis of the functional diagram of the device being diagnosed for the expediency of diagnostic tests of functional blocks in various situations; selection of the block to be tested first, determination of tree parts representatives, formation of possible sequences of elementary test execution in configuration branches, identification of sequences characterized by minimum average costs of implementation; synthesis of the configurations of optimal algorithms from previously determined composite parts. The developed procedure is implemented in the high-level programming language Object Pascal by means of Delphi integrated environment. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The paper presents the procedure of configuration construction for the optimal logical algorithm of electrical equipment diagnosis. A specialized application FC_OPTIM has been created in the framework of this procedure program implementation as applied to industrial frequency converters. Two configurations of logical diagnostic algorithms satisfying the criterion of optimality have been constructed. One of the received configurations corresponds to the MPT-algorithm of frequency converter diagnosis developed by the author of the present article. The algorithm is used when structuring the knowledge base of an expert complex for adjusting frequency converters FC3. **CONCLUSIONS.** An optimal logical algorithm has been developed for the technical diagnosis of industrial frequency converters. It is based on the analysis of the functional diagram.

Keywords: industrial frequency convertor, functional diagram of the device, basic diagnostic test, optimal diagnosis algorithm, procedure of diagnosis algorithm construction, average cost of diagnosis, configuration of diagnosis algorithm

Information about the article. Received June 14, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Dunaev A.M. Procedure of optimal logical diagnosis algorithm construction. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 82–90. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-82-90 (In Russian)

Введение

Достаточное разнообразие заданных допустимых элементарных проверок позволяет получать диагностические алгоритмы различного качества. Представители означенного класса, разработанные и проанализированные автором данной статьи на более ранних этапах исследования, могут быть определены как квазиоптимальные по своему отношению к структуре диагностируемых устройств [1, 2]. При этом следует отметить, что наибольшую практическую значимость имеют задачи построения оптимальных алгоритмов диагностиро-

вания [1, 3], поскольку именно подобные задачи являют собой немаловажный аспект совершенствования средств обслуживания систем в связи с возрастанием сложности последних и повышением требований к эффективности их действия [4–6].

Целью настоящей работы является синтез оптимального алгоритма диагностирования неисправностей преобразователей частоты, основанного на анализе функциональной схемы.

Алгоритмы диагностирования и критерий их оптимальности

Функциональная схема подключения промышленного преобразователя частоты (ПЧ) к электрической сети, представленная на рис. 1, содержит 9 функциональных блоков, а также графическое обозначение передаваемых в системе сигналов [7].

На рис. 1 имеют место следующие обозначения: ВА – вводной автоматический выключатель; ВФ – входной фильтр; НВ – неуправляемый выпрямитель; СФ – сглаживающий фильтр; АИ – авто-

номный инвертор; H – нагрузка преобразователя; БП – блок питания системы управления; СУ – система управления; ПУ – панель управления; $\sim U_c$ – напряжение питающей сети переменного тока; U_{BX} – входное напряжение силовой схемы преобразователя; $U_{ВЫХ}$ – выходное напряжение преобразователя; $U_{БП}$ – выходное напряжение блока питания; U_y – сигнал задания выходной частоты; I_H – ток нагрузки.

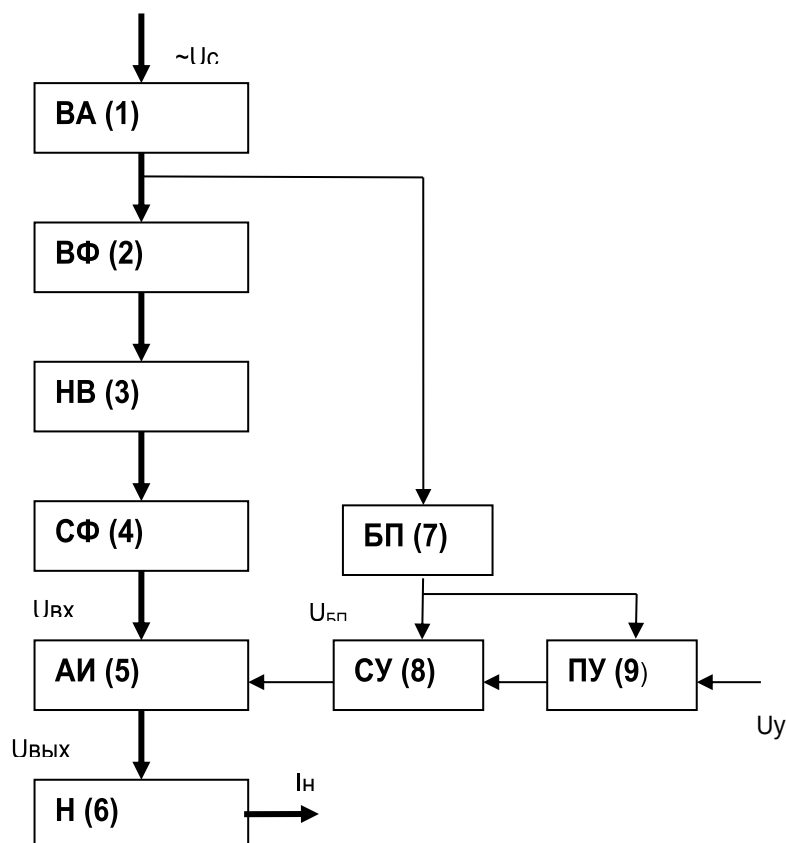


Рис. 1. Функциональная схема подключения промышленного преобразователя частоты
Fig. 1. Functional diagram of industrial frequency convertor connection

Диагностические алгоритмы опираются на функциональную схему диагностируемого устройства и служат для описания порядка проведения элементарных проверок над его функциональными блоками² [8, 9]. Эффективность указанных алгоритмов определяется средними затратами диагностирования для определения одного технического состояния объекта диагностирования, которые могут быть найдены по выражению

$$C(Z_0, E_T) = \sum_{i=1}^N [p(e_i) \sum_{Z_0}^{Z_i} t(e_i)], \quad (1)$$

где Z_0 – первая проверка алгоритма диагностирования; $p(e_i)$ – вес i -го технического состояния среди других технических состо-

яний; $t(e_i)$ – время проверки i -го блока; e_i – техническое состояние i -го функционального блока; E_T – множество технических состояний объекта диагностирования; $e_i \in E_T$; $\sum_{Z_0}^{Z_i} t(e_i)$ – сумма времен проверок алгоритма диагностирования от проверки Z_0 до проверки Z_i ² [2, 9].

Таким образом, критерием оптимальности алгоритма является минимальность средних затрат диагностирования для определения одного технического состояния объекта диагностирования [10]. Данные, необходимые для вычисления этого показателя, представлены в таблице. К ним относятся значения веса технического состояния и времени проверки i -го функционального блока.

²Дунаев М.П. Методы управления технологическим процессом контроля и наладки промышленного оборудования (промышленность): дис. ... д-ра. техн. наук: 05.13.06. Иркутск, 2004. 330 с. / Dunaev M.P. Methods to control the technological process of monitoring and adjustment of industrial equipment (industry). Doctoral Dissertation of technical sciences: 05.13.06. Irkutsk, 2004. 330 p.



Времявероятностные характеристики функциональных блоков
Time-probability characteristics of functional blocks

Характеристика	Функциональный блок								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p(e_i)$	0,01	0,04	0,05	0,02	0,4	0,1	0,14	0,2	0,04
$t(e_i)$	0,05	0,05	0,1	0,02	0,07	0,06	0,05	0,5	0,1

Процедура синтеза оптимального алгоритма

Синтез диагностического алгоритма, характеризующего минимальными затратами, осуществляется согласно предлагаемой методике, включающей следующие этапы:

1. Анализ функциональной схемы диагностируемого устройства на предмет определения целесообразности выполнения проверок конкретных блоков в различных ситуациях.

2. Выбор блока, подлежащего проверке в первую очередь.

3. Построение блочной номенклатуры ветви.

4. Составление полного массива последовательностей выполнения элементарных проверок над блоками ветви.

5. Нахождение оптимальных последовательностей элементарных проверок.

6. Синтез конфигурации (дерева) искомого алгоритма из найденных оптимальных конфигураций его составных частей.

Результатами анализа, проводимого на первом из перечисленных этапов, должны стать два логических массива выполнения проверок (ЛМВП). Один из них формируется на случай получения неисправных выходных сигналов (ЛМВП0), другой – на случай получения исправных выходных сигналов (ЛМВП1).

Второй этап процедуры заключается в выборе блока первой проверки (БПП) по критерию минимальности времени проверки.

Необходимо отметить, что рассматриваемые далее третий, четвертый и пятый этапы выполняются отдельно для каждой из ветвей синтезируемого дерева

алгоритма.

Третий шаг состоит в определении блочной номенклатуры ветви синтезируемого алгоритма на основании результатов выполнения двух предыдущих этапов – данных ЛМВП и информации о БПП.

Четвертая ступень рассматриваемой методики направлена на конструирование всех возможных порядков осуществления элементарных диагностических проверок. По причине наибольшей сложности данной части процедуры для реализации следует продемонстрировать полученное в результате алгоритмизации графическое представление описываемого этапа (рис. 2).

Условием 1 на рассматриваемой схеме обозначен ключевой момент исполнения подпроцедуры, состоящий в сочетании исчерпанности кандидатов младшего уровня с невозможностью формирования из оставшихся представителей такой комбинации, которая являлась бы равнозначной номенклатуре ветви без элемента МБНВ [1].

На пятом этапе предполагается выделение из сформированного массива одной или нескольких последовательностей, характеризующихся минимальными затратами на выполнение (в соответствии с критерием оптимальности алгоритма как последовательности элементарных проверок над функциональными блоками диагностируемого устройства).

Шестой шаг процедуры построения конфигурации оптимального алгоритма по причине своей тривиальности в детализированном описании не нуждается.

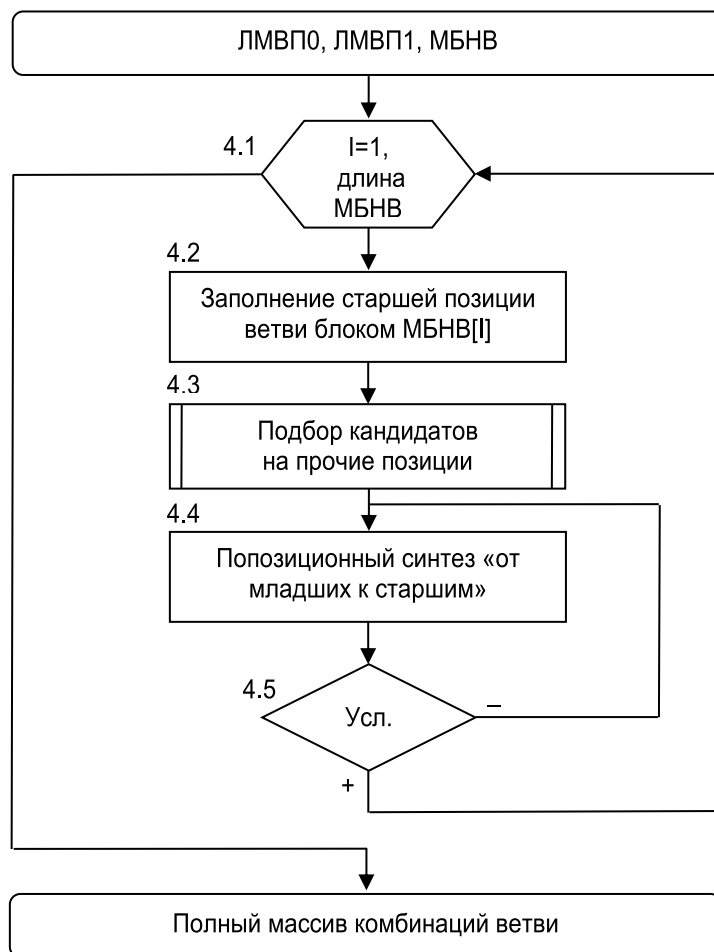


Рис. 2. Блок-схема подпроцедуры составления полного массива комбинаций
Fig. 2. Block-diagram of the subprocedure of complete combination set formation

Работа приложения автоматизированного синтеза оптимального алгоритма

Структура рабочего прототипа «FC_OPTIM» представлена на рис. 3, где имеют место следующие обозначения: ТВВХ – таблица времявероятностных ха-

рактеристик; ЛМВП – логические массивы выполнения проверок; ПМК – полный массив комбинаций; ОА – оптимальный алгоритм.

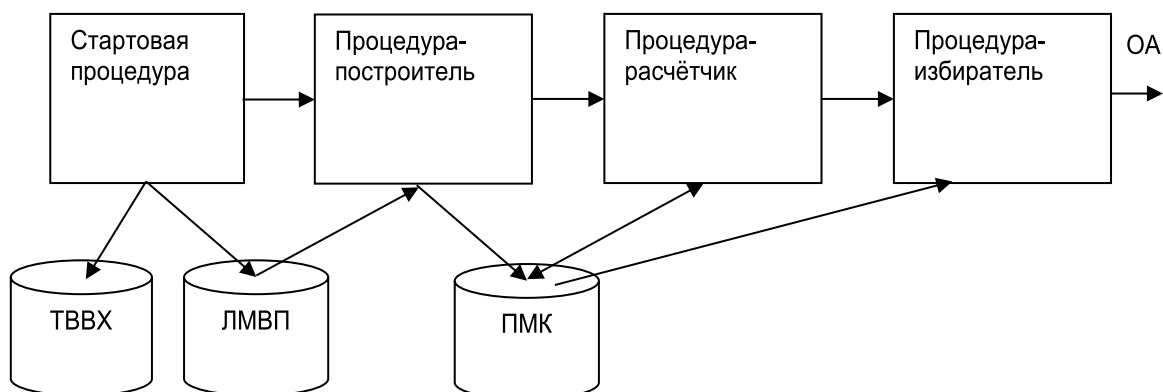


Рис. 3. Структура приложения «FC_OPTIM»
Fig. 3. Structure of FC_OPTIM application



Система представления дерева алгоритма в приложении такова: ячейка, содержащая номер блока, который следует проверить при получении исправного выходного сигнала (левая дочерняя позиция), располагается на следующей строке таблицы непосредственно под ячейкой с номером блока произведенной элементарной проверки (родительской позиции); ячейка с номером блока, подлежащего проверке при получении неисправного сигнала (правая дочерняя позиция), находится правее левой дочерней позиции на соответственно 1, 2, 2^2 , ..., 2^{n-k} ячеек (где n – общее число уровней блоков-кандидатов, k – индекс уровня рассматриваемой материнской позиции, а индекс уровня дочерних позиций БПП принят равным 0).

На рис. 4 проиллюстрировано состояние формы, соответствующее моменту начала работы приложения «FC_OPTIM».

На рис. 5 и 6 зафиксированы результаты работы рассматриваемой программы. Ввиду того что в ходе решения задачи была найдена 1 конфигурация правой ветви и 2 конфигурации левой, возможны две версии дерева алгоритма, отвечающего критерию оптимальности.

Рис. 5 отражает первый вариант представления, соответствующий, как позволяет заключить опыт предыдущих исследований, М1а- и МРО-алгоритмам [7, 8]. На рис. 6 показана конфигурация второго варианта, соответствующего МРТ-алгоритму [8, 10].

FC_OPTIM

Таблица времявероятностных характеристик

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P	0.01	0.04	0.05	0.02	0.4	0.1	0.14	0.2	0.04
T	0.05	0.05	0.1	0.02	0.07	0.06	0.05	0.5	0.1

Дерево алгоритма

ПОСТРОИТЬ

Блок первой проверки (БПП)

Затраты:

Левая ветвь (при исправном сигнале БПП)

Правая ветвь (при неисправном сигнале БПП)

Затраты:

ИТОГОВЫЕ ЗАТРАТЫ

Рис. 4. Приложение «FC_OPTIM». Начало работы
Fig. 4. FC_OPTIM application. Operation start

FC_OPTIM

Таблица времявероятностных характеристик

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
P	0.01	0.04	0.05	0.02	0.4	0.1	0.14	0.2	0.04
T	0.05	0.05	0.1	0.02	0.07	0.06	0.05	0.5	0.1

Дерево алгоритма

ПОСТРОИТЬ

Блок первой проверки (БПП) 4

Затраты: 0.0004

Левая ветвь (при исправном сигнале БПП)

Правая ветвь (при неисправном сигнале БПП)

Затраты: 0.2132

ИТОГОВЫЕ ЗАТРАТЫ: 0.2261

Затраты: 0.0125

Рис. 5. Приложение «FC_OPTIM». Результаты работы. Первая конфигурация
Fig. 5. FC_OPTIM application. Operation results. The first configuration

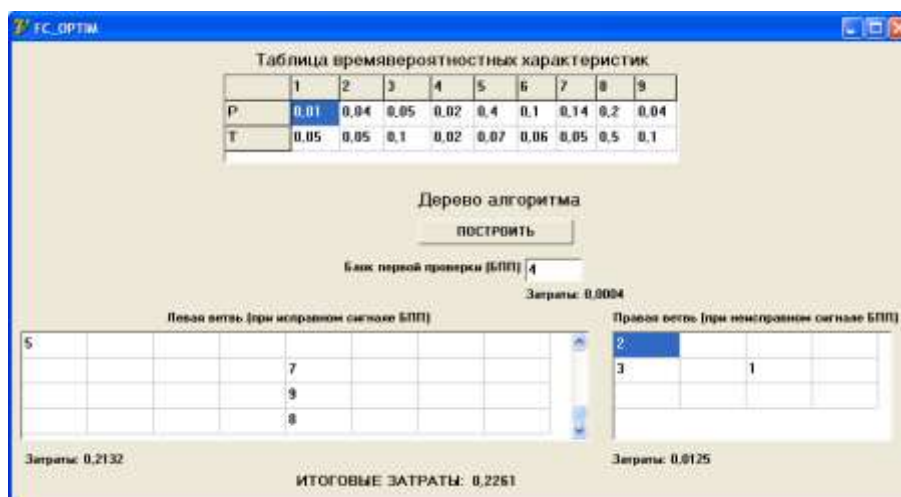


Рис. 6. Приложение «FC_OPTIM». Результаты работы. Вторая конфигурация
Fig. 6. FC_OPTIM application. Operation results. The second configuration

Последняя из построенных конфигураций оптимальных логических алгоритмов диагностирования ПЧ соответствует МРТ-алгоритму, в настоящий момент используемому в качестве основы структурирования базы знаний [2, 11, 12] рабочего прототипа экспертного комплекса для наладки преобразователей частоты «FC3» [8]. Граф дан-

ного алгоритма приведен на рис. 7.

Вершины графа обозначают проверки функциональных блоков, дуги графа – результаты этих проверок: 0 – неисправный сигнал, 1 – исправный сигнал [8]. Прямоугольные рамки содержат номера блоков, в которых локализована выявленная неисправность.

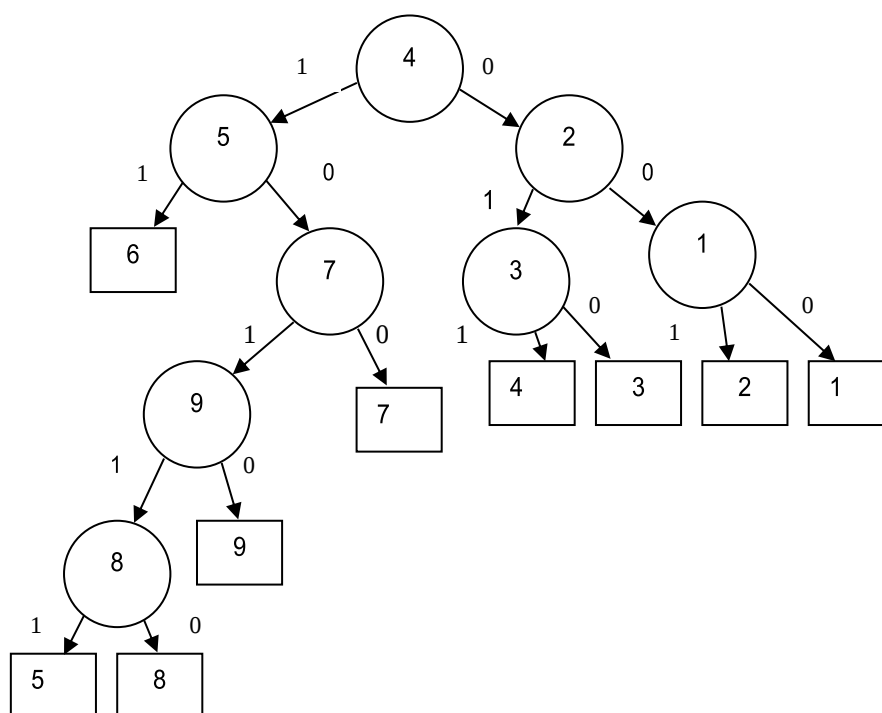


Рис. 7. Граф МРТ-алгоритма
Fig. 7. MPT-algorithm graph



Заключение

В рамках данной работы предложена процедура синтеза оптимального алгоритма диагностирования преобразователей частоты, основанного на анализе функциональной схемы. Разработано приложение «FC_OPTIM» для автоматизации построения описанного алгоритма. Получены две

конфигурации алгоритмов, удовлетворяющие критерию оптимальности. Одна из полученных конфигураций соответствует МРТ-алгоритму, в настоящее время используемому для структурирования базы знаний [12] экспертного комплекса «FC3» [6, 13].

Библиографический список

1. Бахвалов С.В., Дунаев А.М. Анализ оптимальных алгоритмов технического диагностирования // Вестник ИрГТУ. 2016. № 7. С. 55–59. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-7-55-59>
2. Техническая диагностика: сб. науч. тр. I Всесоюзного совещания по технической диагностике / под общ. ред. П.П. Пархоменко. М.: Наука. 1972, 368 с.
3. Григорьев А.В., Осотов В.Н. Диагностика в технике. Понятия, цели, задачи // Электротехника. 2003. № 4. С. 46–51.
4. Забокрицкий Е.И., Холодовский Б.А., Митченко А.И. Справочник по наладке электроустановок и электроавтоматики. 3-е изд., перераб. и доп. Киев: Наукова думка, 1985. 704 с.
5. Мозгалеvский А.В., Калявин В.П., Костанди Г.Г. Диагностирование электронных систем. Л.: Судостроение, 1984. 224 с.
6. Осипов О.И., Усынин Ю.С. Техническая диагностика автоматизированных электроприводов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 160 с.
7. Дунаев М.П. Экспертные системы для наладки электропривода: монография. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2004. 138 с.
8. Дунаев М.П., Дунаев А.М. Экспертный комплекс для наладки преобразователей частоты // Информационные и математические технологии в науке и управлении: материалы XX Байкальской Всерос. конф. (Иркутск–Байкал, 29 июня – 07 июля 2015 г.). Иркутск: Изд-во Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, 2015. Ч. III. С. 20–28.
9. Mukhopad Yu.F., Dunaev M.P., Mariukhnenko V.F., Skrypnik O.N., Sizykh V.N. Management of technical automation equipment of technological processes // Far East Journal of Electronics and Communications. Pushpa Publishing House, Allahabad, India. 2017. Vol. 17. No. 5. P. 1021–1028.
10. Бахвалов С.В., Дунаев А.М., Дунаев М.П. Выбор алгоритма для построения базы знаний экспертной системы диагностирования электрооборудования // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 2. С. 46–51.
11. Дунаев М.П., Дунаев А.М., Каргапольцев С.К., Гозбенко В.Е. Метод структурирования базы знаний экспертной системы для диагностирования электрического оборудования // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2017. № 1 (53). С. 86–89.
12. Arshinskiy L.V., Arshinskiy V.L., Dunaev M.P., Dunaev A.M., Aslamova V.S. Development of the expert system of electrical equipment setup based on logic with vector semantics // Far East Journal of Electronics and Communications. Pushpa Publishing House, Allahabad, India. 2017. Vol. 17. No. 5. P. 1119–1125.
13. Dunaev M.P., Daneev A.V., Kargapol'tsev S.K., Kashkovsky V.V., Kuznetsov B.F. Creation method of the expert systems for electrical installation // Far East Journal of Electronics and Communications. Pushpa Publishing House, Allahabad, India. 2017. Vol. 17. No. 5. P. 1011–1019.

References

1. Bakhvalov S.V., Dunaev A.M. Optimal technical diagnosis algorithms evaluation. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 7, pp. 55–59. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2016-7-55-59>. (In Russian)
2. *Tekhnicheskaya diagnostika: sbornik nauchnykh trudov I Vsesoyuznogo soveshchaniya po tekhnicheskoi diagnostike, pod obshchei redaktsiei P.P. Parhomenko* [Technical diagnostics: Collection of scientific works of I All-Union Meeting on Technical Diagnostics under general editorship of P.P. Parkhomenko]. Moscow: Nauka Publ., 1972, 368 p. (In Russian)
3. Grigor'ev A.V., Osotov V.N. Diagnosis in engineering. Concepts, goals, tasks. *Elektrotekhnika* [Electrical Engineering]. 2003, no. 4, pp. 46–51. (In Russian)
4. Zabokritskii E.I., Kholodovskii B.A., Mitchenko A.I. *Spravochnik po naladke elektroustanovok i elektroavtomatiki* [Reference book on electrical installation and electroautomatic equipment adjustment]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1985. 704 p.
5. Mозgalevskii A.V., Kalyavin V.P., Kostandi G.G. *Diagnostirovanie elektronnykh sistem* [Diagnosis of electronic systems]. Leningrad: Sudostroenie Publ., 1984, 224 p. (In Russian)
6. Osipov O.I., Usynin Yu.S. *Tekhnicheskaya diagnostika avtomatizirovannykh elektroprivodov* [Technical diagnostics of automated electric drives]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1991, 160 p. (In Russian)
7. Dunaev M.P. *Ekspertnye sistemy dlya naladki elektroprivoda* [Expert systems for electric drive adjust-



ment]. Irkutsk, IrSTU Publ., 2004, 138 p. (In Russian)

8. Dunaev M.P., Dunaev A.M. *Ekspertnyi kompleks dlya naladki preobrazovatelei chastoty* [Expert complex for frequency converter adjustment]. *Materialy XX Baikal'skoi Vserossijskoj konferentsii "Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii"* [Materials of XX Baikal All-Russian Conference "Information and mathematical technologies in science and management"]. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS Publ., 2015, part III, pp. 20–28. (In Russian)

9. Mukhopad Yu.F., Dunaev M.P., Mariukhnenko V.F., Skrypnik O.N., Sizykh V.N. Management of technical automation equipment of technological processes. *Far East Journal of Electronics and Communications*. Pushpa Publishing House, Allahabad, India. 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1021–1028.

10. Bakhvalov S.V., Dunaev A.M., Dunaev M.P. The approach to the structuring of knowledge base of expert system for electric equipment diagnosis. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii* [Information and Mathematical Technologies

Критерии авторства

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

Конфликт интересов

Дунаев А.М. заявляет об отсутствии конфликта интересов.

in Science and Management]. 2016, no. 2, pp. 46–51. (In Russian)

11. Dunaev M.P., Dunaev A.M., Kargapol'tsev S.K., Gozbenko V.E. Method of structuring the expert system's knowledge base for diagnostic of electric equipment. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyi analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2017, no. 1 (53), pp. 86–89. (In Russian)

12. Arshinskiy L.V., Arshinskiy V.L., Dunaev M.P., Dunaev A.M., Aslamova V.S. Development of the expert system of electrical equipment setup based on logic with vector semantics. *Far East Journal of Electronics and Communications*. Pushpa Publishing House, Allahabad, India. 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1119–1125.

13. Dunaev M.P., Daneev A.V., Kargapol'tsev S.K., Kashkovsky V.V., Kuznetsov B.F. Creation method of the expert systems for electrical installation. *Far East Journal of Electronics and Communications*. Pushpa Publishing House, Allahabad, India. 2017, vol. 17, no. 5, pp. 1011–1019.

Authorship criteria

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

Conflict of interest

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 66.02:519.771.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-91-100>

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОМЫШЛЕННОГО РЕАКТОРА СИНТЕЗА ПОЛИМЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

© А.Г. Лопатин¹, Б.А. Брыков², Д.П. Вент³

^{1,2,3}Новомосковский институт (филиал) Российского химико-технологического университета им. Д.И. Менделеева, 301665, Российская Федерация, г. Новомосковск, ул. Дружбы, 8.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Процессы радикальной полимеризации метилметакрилата подвержены сильному геле-эффекту, в связи с чем на производстве процесс полимеризации проводят при относительно низкой температуре и большом соотношении мономера и воды, что негативно сказывается на производительности реакторов. Целью данной работы является исследование динамических особенностей типового промышленного реактора при различных режимах протекания процесса для дальнейшей разработки системы управления таким реактором.

МЕТОДЫ. Для получения передаточной функции объекта управления в предыдущей работе было составлено математическое описание реактора в виде системы дифференциальных уравнений теплового баланса и получена структурная схема объекта управления. В этой статье, используя Mathcad и MATLAB Simulink, показаны диапазоны изменения всех параметров объекта управления в зависимости от степени конверсии мономера при различных режимах протекания процесса. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Получено семейство кривых разгона объекта управления при разных режимах протекания процесса. **ВЫВОДЫ.** Полученные результаты соответствуют реальным данным производства полиметилметакрилата на промышленных предприятиях.

Ключевые слова: реактор-полимеризатор, полиметилметакрилат, радикальная полимеризация, математическое моделирование, передаточная функция, геле-эффект.

Информация о статье. Дата поступления 05 июня 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Лопатин А.Г., Брыков Б.А., Вент Д.П. Исследование динамических свойств промышленного реактора синтеза полиметилметакрилата // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 91–100. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-91-100

STUDYING DYNAMIC PROPERTIES OF AN INDUSTRIAL REACTOR FOR POLYMETHYL METHACRYLATE SYNTHESIS

A.G. Lopatin, B.A. Brykov, D.P. Vent

Novomoskovsk Institute (branch) of the Federal state budgetary educational institution of higher education "Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia"
8, Druzhba St., Novomoskovsk, 301665, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The processes of radical polymerization of methyl methacrylate are subjected to a strong gel effect and in this connection the polymerization process is carried out at a relatively low temperature and a high ratio of a monomer and water, which negatively affects the productivity of reactors. The purpose of this publication is to study the

¹Лопатин Александр Геннадиевич, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: a_lopatin@mail.ru

Aleksandr G. Lopatin, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Automation of Production Processes, e-mail: a_lopatin@mail.ru

²Брыков Богдан Александрович, ассистент кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: brybogdan@yandex.ru

Bogdan A. Brykov, Assistant Professor of the Department of Automation of Production Processes, e-mail: brybogdan@yandex.ru

³Вент Дмитрий Павлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизации производственных процессов, e-mail: dvent@list.ru

Dmitriy P. Vent, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Automation of Production Processes, e-mail: dvent@list.ru



dynamic features of a typical industrial reactor under various process conditions for the further development of a control system for such reactor. **METHODS.** In order to obtain the transfer function of the control object our previous work provided a mathematical description of the reactor in the form of a system of differential equations of heat balance and a structural diagram of the control object. Using Mathcad and MATLAB Simulink, this article shows the variation ranges of all parameters of the control object depending on the degree of monomer conversion under different flow conditions of the process. **RESULTS.** A family of transient response curves of the control object is obtained under different flow conditions of the process. **CONCLUSIONS.** The obtained results correspond to the real data of polymethyl methacrylate production at industrial enterprises.

Keywords: reactor-polymerizer, polymethyl methacrylate, radical polymerization, mathematical modeling, transfer function, gel effect

Information about the article. Received June 5, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Lopatin A.G., Brykov B.A., Vent D.P. Studying dynamic properties of an industrial reactor for polymethyl methacrylate synthesis. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 9, pp. 91–100. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-91-100 (In Russian)

Введение

Радикальная полимеризация в химической промышленности – это один из основных способов получения полимеров в реакторах периодического действия. Типовым представителем процессов этого вида является процесс радикальной полимеризации метилметакрилата (ММА). Объектом управления (ОУ) в процессе радикальной полимеризации являются реакторы периодического действия объемом 10–20 м³, снабженные рубашкой для подвода тепла и охлаждения реакционной смеси и лопастной мешалкой для равномерного перемешивания в течение процесса [1–6].

Известно, что характерной чертой процесса радикальной полимеризации ММА является наличие жесткого гель-эффекта – явления резкого повышения температуры реакционной смеси при достижении определенной (~30%) степени превращения мономера – ММА, в полимер – полиметилметакрилат (ПММА) [2, 4, 7–12].

Нарушение температурного режима протекания процесса полимеризации приводит, как минимум, к ухудшению эксплуатационных свойств готового продукта, но может также вывести реактор из устойчивого положения, то есть привести к аварийной ситуации. Для того чтобы гель-эффект не был столь ярко выражен, процесс радикальной полимеризации обычно проводят при температуре 60°C (в таком случае процесс протекает примерно за 4 часа [2, 3]), а также при загрузке в аппарат принимают соотношение мономера и воды (М:В) 1:4. Заметим, что при таком соотношении М:В за 1 цикл синтеза ПММА в типовом реакторе объемом 12,5 м³ при условии его заполнения на 80% (10 м³) в идеале можно получить не более 2 м³ (~2260 кг) готового продукта.

В этой связи актуальной является задача повышения производительности реактора синтеза ПММА за счет уменьшения содержания водной фазы в соотношении М:В. Для решения этой проблемы планируется разработать робастную систему автоматического управления на основе алгоритмов нечеткой логики, применение которой позволит проводить процесс синтеза ПММА при повышенной температуре (70–80°C) и соотношении М:В с меньшим количеством водной фазы (1:3 или 1:2), чем обычно (1:4) без потери качества готового продукта.

Для синтеза подобной системы управления и проверки адекватности ее работы необходимо подробно изучить динамические свойства реактора при различных соотношениях М:В и разных температурных режимах протекания процесса, то есть нужно получить набор соответствующих переходных характеристик ОУ – именно это и является целью данной работы.

Методы и получение результатов

Ранее в работе [13] был выполнен расчет параметров промышленного реактора объемом $12,5 \text{ м}^3$, а также дано его математическое описание в виде системы из трех дифференциальных уравнений теплового баланса, записанных для потоков хладагента, стенки корпуса реактора и реакционной смеси. Исходя из этих уравнений была получена структурная схема ОУ в виде передаточных функций (рис. 1):

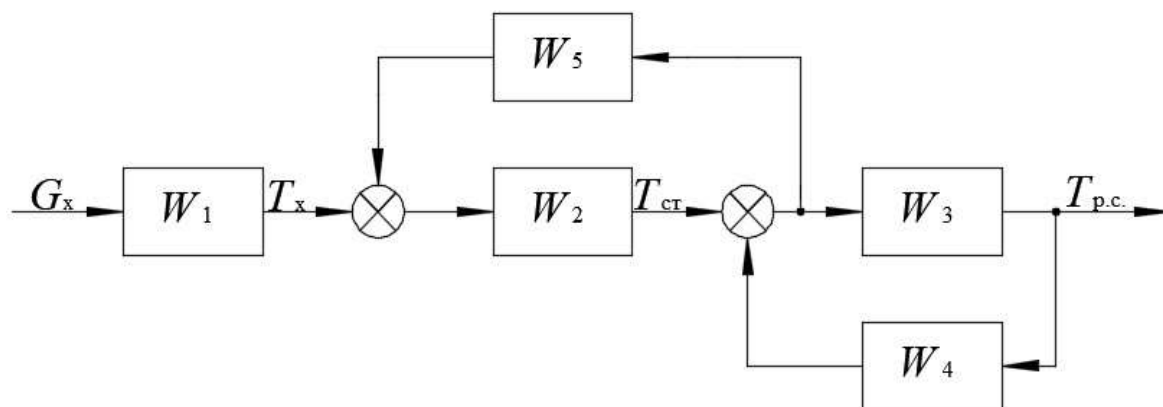


Рис. 1. Структурная схема объекта управления
Fig.1. Structure diagram of the control object

На схеме (см. рис. 1):

$W_1(S)$ – передаточная функция по каналу управления «расход хлад-агента G_x – температура хладагента T_x »:

$$W_1(S) = W_{G_x-T_x}(S) = \frac{K_1}{T_1 \cdot S + 1},$$

где

$$K_1 = \frac{c_{p_x} T_{x0} - c_{p_x} T_x}{G_x c_{p_x} + \alpha_x S_{\text{внеш}}} \left[\frac{\text{мин} \cdot \text{К}}{\text{кг}} \right]; T_1 = \frac{V_p \rho_x c_{p_x}}{G_x c_{p_x} + \alpha_x S_{\text{внеш}}} [\text{мин}].$$

(1)

Здесь c_{p_x} – удельная теплоемкость хладагента, Дж/(кг·К); T_{x0} , T_x – температура хладагента на входе в рубашку и на выходе из рубашки соответственно, К; V_p – объем рубашки, м^3 ; ρ_x – плотности хладагента, $\text{кг}/\text{м}^3$; G_x – массовый расход хладагента, $\text{кг}/\text{с}$; α_x – коэффициент теплоотдачи от стенки корпуса реактора к хладагенту, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; $S_{\text{внеш}}$ – внешняя площадь поверхности теплопередачи стенки реактора, м^2 ;

$W_2(S)$ – передаточная функция по каналу управления «температура хладагента T_x – температура стенки корпуса реактора $T_{\text{ст}}$ », рассчитывается по формуле:

$$W_2(S) = W_{T_x-T_{\text{ст}}}(S) = \frac{K_2}{T_2 \cdot S + 1},$$

где

$$K_2 = \frac{\alpha_x S_{\text{внеш}}}{\alpha_{\text{ст}}(t) S_{\text{внутр}} + \alpha_x S_{\text{внеш}}} [-]; T_2 = \frac{mc_{p_{\text{ст}}}}{\alpha_{\text{ст}}(t) S_{\text{внутр}} + \alpha_x S_{\text{внеш}}} [\text{мин}].$$

(2)



Здесь m – масса вещества стенки, кг; $c_{p_{cm}}$ – удельная теплоемкость стенки корпуса, Дж/(кг·К); $\alpha_{cm}(t)$ – коэффициент теплоотдачи от реакционной смеси к стенке корпуса реактора, Вт/(м²·К); $S_{внутр}$ – внутренняя площадь поверхности теплопередачи стенки реактора, м²;

$W_3(S)$ – передаточная функция по каналу управления «температура стенки корпуса реактора T_{cm} – температура реакционной смеси $T_{p.c.}$ »:

$$W_3(S) = W_{T_{cm}-T_{p.c.}}(S) = \frac{K_3}{T_3 \cdot S + 1},$$

где

$$K_3 = \frac{(-\Delta H_p)k_p(t)\lambda_0(t)M(t)V_{mma}(t)}{\alpha_{cm}(t)S_{внутр}T_{cm}} [-]; \quad T_3 = \frac{V_{p.c.}(t)\rho_{p.c.}(t)c_{p.p.c.}(t)}{\alpha_{cm}(t)S_{внутр}} [\text{мин}]. \quad (3)$$

Здесь ΔH_p – энтальпия процесса, кДж/моль; $k_p(t)$ – константа скорости роста цепи, м³/(моль·с); $\lambda_0(t)$ – начальный момент живой полимерной цепи, моль/м³; $M(t)$ – концентрация мономера, моль/м³; $V_{mma}(t)$ – объем мономера, м³; $V_{p.c.}(t)$ – объем реакционной смеси, м³; $\rho_{p.c.}(t)$ – плотность реакционной смеси, кг/м³; $c_{p.p.c.}(t)$ – удельная теплоемкость реакционной смеси, Дж/(кг·К); T_{cm} – температура стенки корпуса реактора, К;

$W_4(S)$ – передаточная функция по каналу управления «температура реакционной смеси $T_{p.c.}$ – температура стенки корпуса реактора T_{cm} »:

$$W_4(S) = W_{T_{p.c.}-T_{cm}}(S) = \frac{K_4}{T_4 \cdot S + 1},$$

где

$$K_4 = \frac{\alpha_{cm}(t)S_{внутр}}{\alpha_{cm}(t)S_{внутр} + \alpha_x S_{внеш}} [-]; \quad T_4 = T_2 = \frac{mc_{p_{cm}}}{\alpha_{cm}(t)S_{внутр} + \alpha_x S_{внеш}} [\text{мин}]; \quad (4)$$

$W_5(S)$ – передаточная функция по каналу управления «температура стенки корпуса реактора T_{cm} – температура хладагента T_x »:

$$W_5(S) = W_{T_{cm}-T_x}(S) = \frac{K_5}{T_5 \cdot S + 1},$$

где

$$K_5 = \frac{\alpha_x S_{внеш}}{G_x c_{p_x} + \alpha_x S_{внеш}} [-]; \quad T_5 = T_1 = \frac{V_p \rho_x c_{p_x}}{G_x c_{p_x} + \alpha_x S_{внеш}} [\text{мин}]. \quad (5)$$

Рассмотрим подробнее все значения K и T , входящие в состав передаточной функции ОУ.

Исходя из приведенных выражений, определяющих параметры K_1 , K_5 – коэффициенты усиления, и T_1 , T_5 – постоянные времени, видно, что их значения зависят только от расхода хладагента G_x и температуры хладагента на выходе из рубашки T_x (от T_x зависит только K_1). Остальные величины, входящие в состав выражений, были рассчитаны в [13] и являются константами, то есть не зависят от температуры процесса и соотношения М:В. На рис. 2 показано



изменение коэффициентов усиления K_1 , K_5 и постоянных времени T_1 , T_5 в зависимости от расхода хладагента G_x .

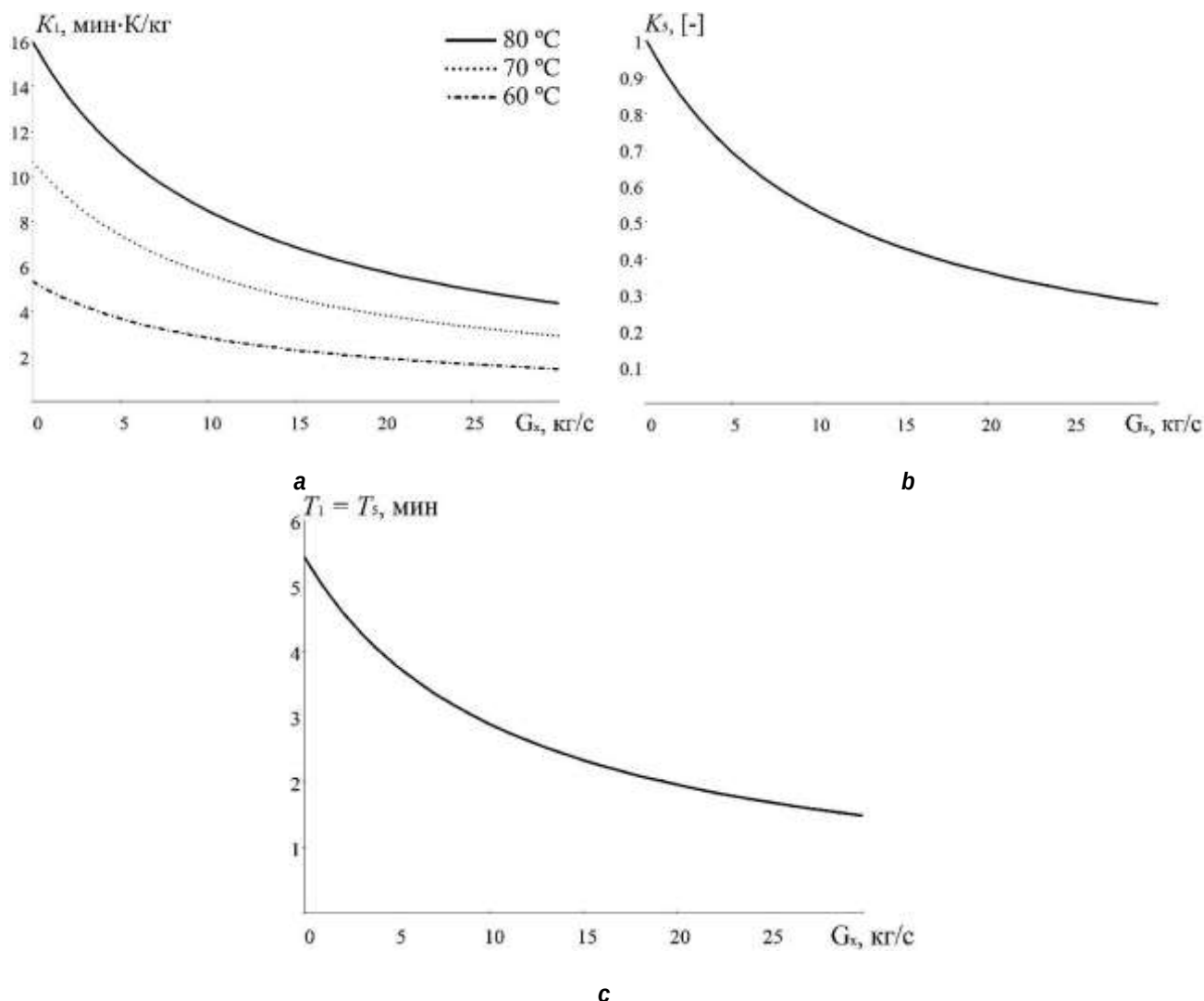


Рис. 2. Кривые изменения коэффициента усиления K_1 (а), коэффициента усиления K_5 (б) и постоянных времени T_1 , T_5 (с) в зависимости от расхода хладагента (для случаев (б) и (с) кривая одна, т.к. K_5 и T_1 , T_5 не зависят от температуры)

Fig. 2. Curves of change in the gain factor K_1 (a), gain factor K_5 (b) and time constants T_1 , T_5 (c) as a function of the coolant flow rate (there is only one curve for the cases (b) and (c) as K_5 and T_1 , T_5 don't depend on the temperature)

Анализ представленных на рис. 2 графиков показал, что в диапазоне $G_x = 0\text{--}25$ кг/с коэффициенты усиления K_1 , K_5 и постоянные времени T_1 , T_5 уменьшаются в 3,66 раз.

Рассмотрим коэффициенты усиления K_2 , K_4 и постоянные времени T_2 , T_4 . Эти параметры зависят только от коэффициента теплоотдачи $\alpha_{cm}(t)$, который в свою очередь зависит от конверсии мономера (эта зависимость была реализована в работе [13]). В качестве примера на рис. 3 приведены графики зависимости коэффициентов усиления K_2 , K_4 и постоянных времени T_2 , T_4 от степени конверсии мономера для температур протекания процесса 60–80 °С и соотношения М:В = 1:2 (подобные кривые были получены также для соотношений М:В = 1:1, 1:3 и 1:4 для всех рассматриваемых температурных режимов протекания процесса).

Из рис. 3 видно, что в течение процесса рассматриваемые параметры меняются не-



значительно (в пределах 1%), тем не менее, даже столь незначительное изменение параметров ОУ также будет учитываться при построении кривой разгона ОУ.

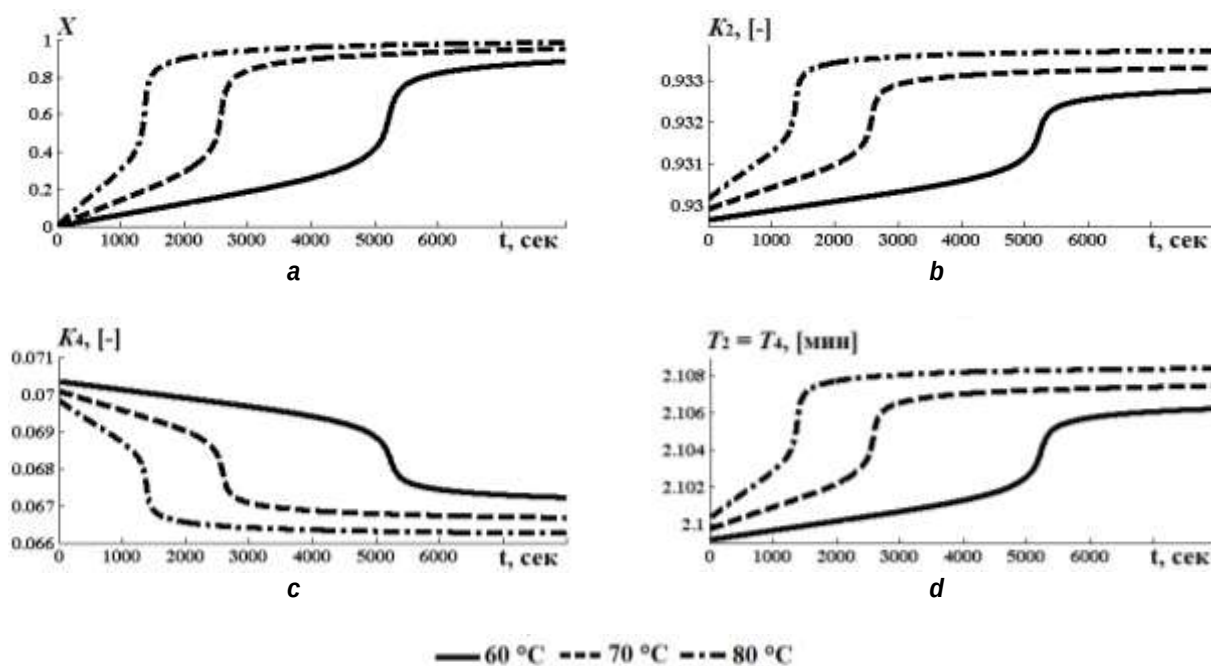


Рис. 3. Кривые изменения коэффициента усиления K_2 (b), коэффициента усиления K_4 (c) и постоянных времени T_2 , T_4 (d) в зависимости от степени конверсии мономера (a) для температур 60–80 °C и соотношения М:В = 1:2
Fig. 3. Curves of change in the gain factor K_2 (b), gain factor K_4 (c) and time constants T_2 , T_4 (d) as a function of the degree of monomer conversion (a) for the temperatures of 60–80 °C and the ratio М:W = 1:2

Коэффициент усиления K_3 и постоянная времени T_3 характеризуют динамические свойства реактора и зависят главным образом от кинетики процесса полимеризации (константа скорости роста цепи, начальный момент живой полимерной цепи, концентрация мономера), а также от объема мономера, который в свою очередь определяется заданным соотношением М:В.

Из всего вышесказанного следует, что K_3 и T_3 будут меняться в разной степени в зависимости от температурного режима протекания процесса и от соотношения М:В. На рис. 4 показана зависимость коэффициента усиления K_3 и постоянной времени T_3 от степени конверсии мономера для температур протекания процесса 60–80 °C и соотношения М:В = 1:2 (подобные кривые были получены также для соотношений М:В = 1:1, 1:3 и 1:4 для всех рассматриваемых температурных режимов протекания процесса).

По рис. 4 видно, что гель-эффект оказывает большое влияние на значения K_3 и T_3 , механизм протекания данных явлений описан в работах [10, 11, 14, 15]. Отметим лишь, что по окончании действия гель-эффекта (степень конверсии мономера $X > 80\%$) значения K_3 при любом соотношении М:В и любой температуре протекания процесса стремятся к минимуму, что следует из выражения (3).

Используя разработанную в MATLAB Simulink структурную схему ОУ, аналогичную изображенной на рис. 1, с учетом изменения параметров $K_1 - K_5$ и $T_1 - T_5$ получим кривые разгона ОУ при соотношениях М:В = 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 для температурных режимов протекания процесса 60, 70 и 80 °C для ряда значений расхода хладагента $G_x = 5, 10, 15, 20, 25$ и 30 кг/с (рис. 5).

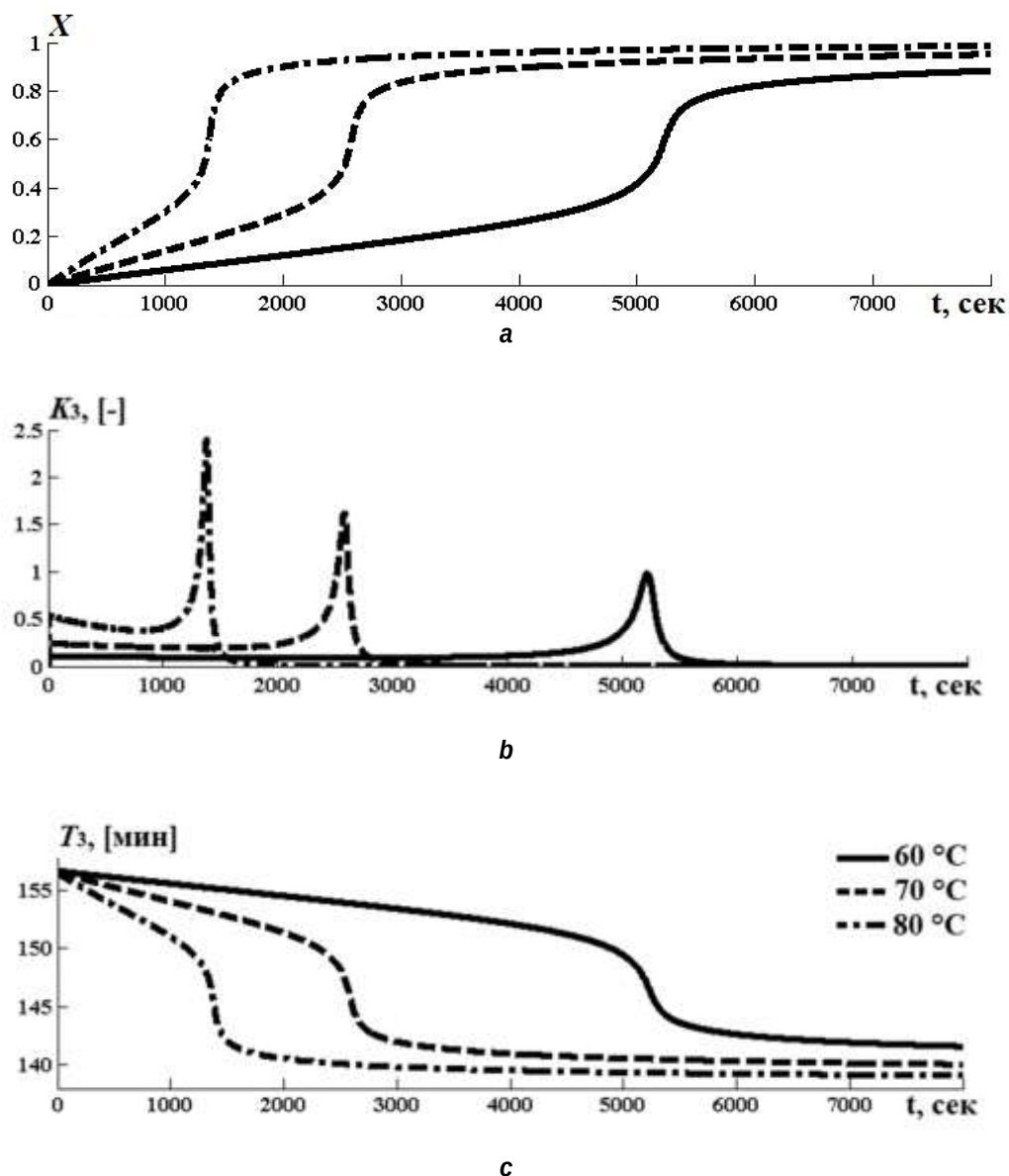


Рис. 4. Кривые изменения коэффициента усиления K_3 (b) и постоянной времени T_3 (c) в зависимости от степени конверсии мономера (a) для температур 60–80 °C и соотношения $M:B = 1:2$
Fig. 4. Curves of change in the gain factor K_3 (b) and the time constant T_3 (c) as a function of the degree of monomer conversion (a) for the temperatures of 60–80 °C and the ratio $M:W = 1:2$

Анализируя полученные данные, можно отметить, что такие параметры, как расход хладагента и выбор соотношения $M:B$, оказывают определяющее влияние на ход протекания процесса полимеризации: чем ниже температура протекания процесса и выше содержание водной фазы в соотношении $M:B$, тем менее выражен тепловой эффект реакции. Согласно полученным кривым, при соотношении $M:B = 1:4$ и температуре процесса 60 °C тепловой эффект практически не наблюдается, что соответствует реальным данным синтеза ПММА на производстве [2, 3].

Кроме того, при температуре 60 °C процесс полимеризации заканчивается (степень конверсии мономера достигает 95%) через 4,1 часа, что также полностью совпадает с реальными данными [2, 3].

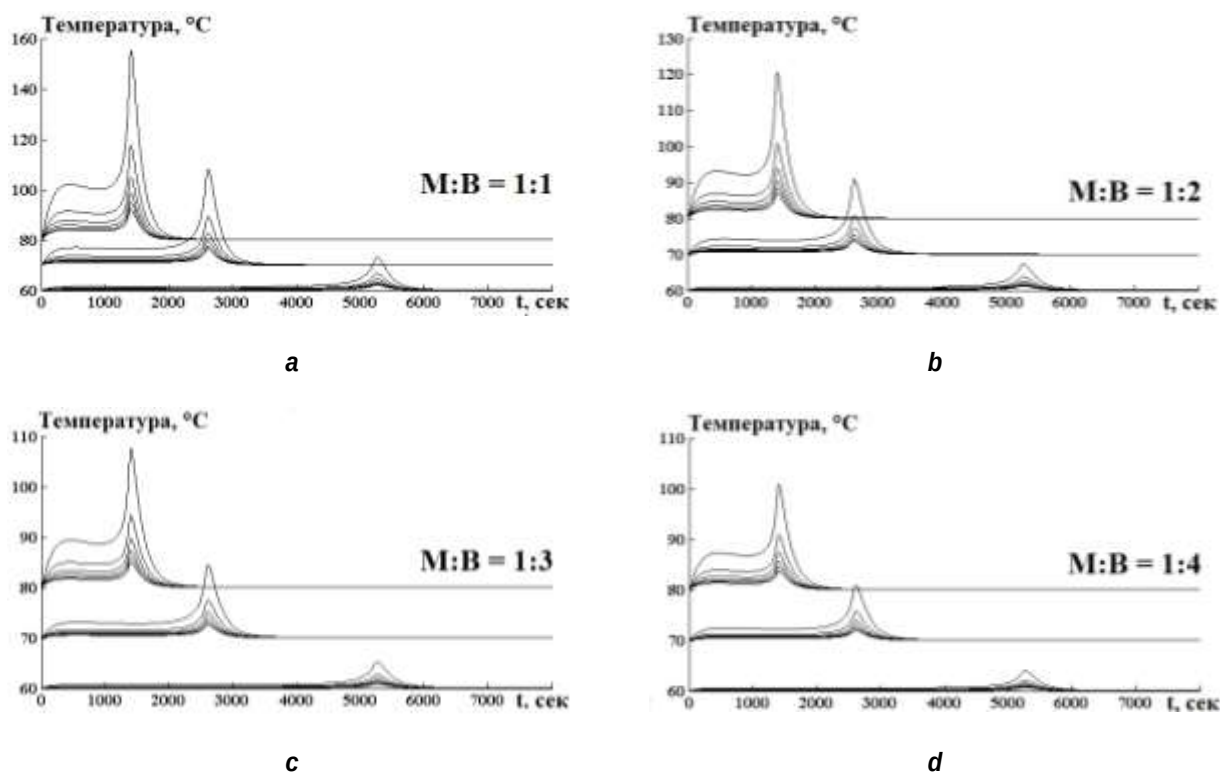


Рис. 5. Кривые разгона объекта управления в зависимости от степени конверсии мономера и расхода хладагента для температур 60–80°C и соотношения $M:B = 1:1$ (а), $1:2$ (b), $1:3$ (c), $1:4$ (d) (на графиках слева направо изображены кривые для температур 80, 70 и 60°C, сверху вниз – для расходов хладагента 5, 10, 15, 20, 25, 30 кг/с)

Fig. 5. Transient response curves of the control object depending on the degree of monomer conversion and coolant flow rate for the temperatures of 60–80°C and the ratio $M:W = 1:1$ (a), $1:2$ (b), $1:3$ (c), $1:4$ (d) (from left to right the graphs show the curves for the temperatures of 80, 70 and 60 °C, from top to bottom – the curves for the coolant flow rates of 5, 10, 15, 20, 25, 30 kg/s)

С уменьшением содержания водной фазы в соотношении $M:B$ гель-эффект становится все более выраженным, и в таком случае поддерживать стабильный температурный режим протекания процесса, используя классические технологии управления, основанные на принципах классического ПИД-регулятора, становится все сложнее, вплоть до выхода реактора из устойчивого состояния.

Выводы

Из вышесказанного становится очевидной необходимость разработки робастных систем управления, которые могли бы работать в условиях сильной нестационарности параметров ОУ, и, применяя их, можно было бы добиться существенного увеличения выхода готового продукта (ПММА) с 1 цикла производства и общего ускорения протекания процесса за счет уменьшения соотношения $M:B$. Так, при соотношении $M:B = 1:3$ (вместо стандартного $1:4$) для реактора объемом 12,5 м³ выход продукта увеличится в 1,2 раза, при $M:B = 1:2$ – в 1,6 раз, а при $M:B = 1:1$ – в 2,5 раза). Кроме того, при увеличении температуры до 70°C процесс полимеризации будет завершен за 2,2 часа, а при температуре 80°C – за 0,93 часа.



Библиографический список

1. Комиссаров Ю.А., Глебов М.Б., Гордеев Л.С., Вент Д.П. Химико-технологические процессы. 2-е изд. М.: Юрайт, 2018. 359 с.
2. Коршак В.В. Технология пластических масс. 3-е изд. М.: Химия, 1985. 560 с.
3. Ушева Н.В., Мойзес О.Е., Митянина О.Е., Кузьменко Е.А. Математическое моделирование химико-технологических процессов. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. 140 с.
4. Савельянов В.П. Общая химическая технология полимеров. М.: Академкнига, 2007. 336 с.
5. Lucia S., Finkler T., Engell S. Multi-stage nonlinear model predictive control applied to a semi-batch polymerization reactor under uncertainty // *Journal of Process Control*. 2013. No. 23. P. 1306–1319.
6. Nguyen S.T., Hoang N.H., Hussain M.A. Analysis of the Steady-State Multiplicity Behavior for Polystyrene Production in the CSTR // *Chemical product and process modeling*. 2017. No. 12 (4).
7. Киреев В.В. Высокомолекулярные соединения: в 2 ч. М.: Юрайт, 2016. Ч. 1. 365 с.
8. Аржаков М.С. Высокомолекулярные соединения. М.: Юрайт, 2018. 340 с.
9. Hossein R., Ahmad A.S., Grady M., Rappe A., Soroush M. Experimental and theoretical study of the self-initiation reaction of methyl acrylate in free-radical polymerization // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2017. P. 2–29.
10. Garg D.K., Serra C.A., Hoarau Y., Parida D., Bouquey M., Muller R. Analytical solution of free radical polymerization: Applications-implementing gel effect using CCS model // *Macromolecules*. 2014. P. 2–13.
11. Law W.P., Wan Hanisah W.I., Gimbin J. Modeling of methyl methacrylate polymerization using MATLAB // *Chemical product and process modeling*. 2016. P. 1–12.
12. David V.V., Jorge H.O., Ricardo C.L.A., Estevez M. Autoacceleration in Bulk Free-Radical Polymerization: Effect of Chain Transfer // *Macromolecular chemistry and physics* 219. No. 5. 2017. P. 1–7.
13. Вент Д.П., Лопатин А.Г., Брыков Б.А. Исследование математической модели промышленного реактора-полимеризатора // *Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, Экология, Экономика*. 2018. Т. 20. Ч. I. С. 9–22.
14. Брыков Б.А., Лопатин А.Г., Вент Д.П. Исследование нестационарности параметров промышленного реактора-полимеризатора на основе кинетической модели процесса радикальной полимеризации метилметакрилата // *Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. М., 2017. Т. 31. № 8 (189). С. 10–12.*
15. Лопатин А.Г., Брыков Б.А., Вент Д.П. Исследование устойчивости робастной нечеткой системы управления химическим реактором периодического действия // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2017. № 12-1. С. 10–17.

References

1. Komissarov Yu.A., Glebov M.B., Gordeev L.S., Vent D.P. *Himiko-tekhnologicheskie process* [Chemical and technological processes]. Moscow: Yurajt Publ., 2018, 359 p. (In Russian)
2. Korshak V.V. *Tekhnologiya plasticheskikh mass* [Technology of plastic mass]. Moscow: Himiya Publ., 1985, 560 p. (In Russian)
3. Uшева N.V., Mojzes O.E., Mityanina O.E., Kuz'menko E.A. *Matematicheskoe mo-delirovanie himiko-tekhnologicheskikh processov* [Mathematical modeling of chemical and technological processes]. Tomsk: Tomsk Polytechnic University Publ., 2014, 140 p. (In Russian)
4. Savel'yanov V.P. *Obshchaya himicheskaya tekhnologiya polimerov* [General chemical technology of polymers]. Moscow: Akademkniga Publ., 2007, 336 p. (In Russian)
5. Lucia S., Finkler T., Engell S. Multi-stage nonlinear model predictive control applied to a semi-batch polymerization reactor under uncertainty. *Journal of process control*, 2013, no. 23, pp. 1306–1319.
6. Nguyen S.T., Hoang N.H., Hussain M.A. Analysis of the Steady-State Multiplicity Behavior for Polystyrene Production in the CSTR. *Chemical product and process modeling*, 2017, no. 12 (4).
7. Kireev V.V. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [High-molecular weight compounds]. Moscow: Yurajt Publ., 2016, part. 1, 365 p. (In Russian)
8. Arzhakov M.S. *Vysokomolekulyarnye soedineniya* [High-molecular weight compounds]. Moscow: Yurajt Publ., 2018, 340 p. (In Russian)
9. Hossein R., Ahmad A.S., Grady M., Rappe A., Soroush M. Experimental and theoretical study of the self-initiation reaction of methyl acrylate in free-radical polymerization. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2017, pp. 2–29.
10. Garg D.K., Serra C.A., Hoarau Y., Parida D., Bouquey M., Muller R. Analytical solution of free radical polymerization: Applications-implementing gel effect using CCS model. *Macromolecules*, 2014, pp. 2–13.
11. Law W.P., Wan Hanisah W.I., Gimbin J. Modeling of methyl methacrylate polymerization using MATLAB. *Chemical product and process modeling*, 2016, pp. 1–12.
12. David V.V., Jorge H.O., Ricardo C.L.A., Estevez M. Autoacceleration in Bulk Free-Radical Polymerization: Effect of Chain Transfer. *Macromolecular chemistry and physics* 219, 2017, no. 5, pp. 1–7.
13. Vent D.P., Lopatin A.G., Brykov B.A. Study of the mathematical model of industrial reactor-polymerizer. *Vestnik*



Mezhdunarodnoj Akademii Sistemnyh Issledovanij. Informatika, Ekologiya, Ekonomika [Bulletin of the International Academy of System Studies. Information Science, Environmental Studies, Economics]. 2018, vol. 20, part. I, pp. 9–22. (In Russian)

14. Brykov B.A., Lopatin A.G., Vent D.P. *Issledovanie nestacionarnosti parametrov promyshlennogo reaktora-polimerizatora na osnove kineticheskoy modeli processa radikal'noj polimerizacii metilmetakrilata* [The research of non-stationarity parameters of the industrial reactor-polymerizer on the basis of the kinetic model of the process of radical polymerization of methyl methacrylate]. *Uspekhi v himii i himicheskoy tekhnologii* [Advances in Chemistry and Chemical Technology]. Moscow, 2017, vol. 31, no. 8 (189), pp. 10–12. (In Russian)

15. Lopatin A.G., Brykov B.A., Vent D.P. A research of the sustainability of the robust fuzzy control system for the chemical batch reactor. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya Tula State University]. 2017, no. 12-1, pp. 10–17. (In Russian)

Критерии авторства

Лопатин А.Г., Брыков Б.А. и Вент Д.П. имеют равные авторские права на статью и несут равную ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Lopatin A.G., Brykov B.A., Vent D.P. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК: 519.233.5

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-101-110>

К ВОПРОСУ АВТОМАТИЗАЦИИ ПОСТРОЕНИЯ ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЕЙ

© А.В. Петров¹

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬЮ исследования является сравнение программных средств автоматизированного построения имитационных моделей. **МЕТОДЫ.** Основными методами исследования являются системный анализ и методы и технологии обогащения полезных ископаемых. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Исследованы существующие программные средства автоматизированного синтеза имитационных моделей. Рассмотрены универсальные средства синтеза имитационных моделей, определены отличительные параметры продуктов, на примере обогащения полезных ископаемых проведен сравнительный анализ универсальных и уникальных программных средств с точки зрения их применения к сложным промышленным технологическим процессам. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Анализ существующих программных продуктов, решающих задачу автоматизации построения имитационной модели и способных моделировать технологические производственные процессы, позволяет сделать вывод, что универсальность не является ключевым параметром при выборе программного продукта. Главным является ориентация на требования и возможности пользователя имитационной модели.

Ключевые слова: синтез имитационных моделей, программные продукты, параметры сравнения, универсальность, предметная область, обогащение полезных ископаемых.

Информация о статье. Дата поступления 15 июля 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Петров А.В. К вопросу автоматизации построения имитационных моделей // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 101–110. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-101-110

TO THE PROBLEM OF SIMULATION MODELING AUTOMATION

A.V. Petrov

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

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the study is to compare the software tools for the computer-assisted construction of simulation models. **METHODS.** The main research methods include system analysis and methods and technologies for mineral processing. **RESULTS.** The study is given to the existing programming tools for the automated synthesis of simulation models. The universal means of simulation model synthesis are considered and the characteristic parameters of products are determined. The comparative analysis of universal and unique software tools is given in terms of their application in complex industrial technological processes on example of mineral processing. **CONCLUSION.** Having analyzed the existing software products engaged in solving the automation problem of simulation modeling and capable of technological production process modelling, we derived a conclusion that versatility is not a key parameter when choosing a software product. The focus should be on the requirements and capabilities of the simulation model user.

Keywords: synthesis of simulation models, software products, comparison parameters, versatility, subject area, mineral processing

Information about the article. Received July 15, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

¹Петров Александр Васильевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем, e-mail: petrov@istu.edu
Alexander V. Petrov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Automated Systems, e-mail: petrov@istu.edu



For citation. Petrov A.V. To the problem of simulation modeling automation// Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol.22, no. 9, pp. 101–110. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-101-110 (In Russian)

Введение

Любая деятельность, связанная с анализом и синтезом имитационных моделей, имеет целью повышение эффективности исследуемых систем. Очевидно, что качество исследований в существенной мере зависит от эффективности инструментальной базы создания и использования моделей. К этой базе, помимо различного технического инструментария, теоретических и прикладных методов и методик проведения анализа и синтеза и других общеизвестных элементов, следует отнести так называемые автоматизированные системы построения имитационных моделей [1]. В определенной степени автоматизированные системы построения имитационных моделей (АСПИМ) могут считаться частью автоматизированных систем научных исследований (АСНИ). Из наименования АСНИ ясно их назначение – повышение эффективности научной деятельности. Но, пожалуй, трудно найти примеры использования автоматизированных систем научных исследований (кроме аппаратурной, технической ее части) в производственной сфере. В основном в АСНИ используется для решения традиционных задач научных исследований (например, статистического анализа, визуализации и т.п.). Но речь не идет о применении АСНИ в изучении, проектировании, модернизации промышленных технологий.

Взрывной характер развития вычислительной техники и информационных технологий породили в последнее время понятие цифровой экономики. Но внедрение цифровых подходов в промышленности создало и относительно новые понятия – цифровой двойник и цифровая тень (например, [2–4]).

«Цифровым двойником называют виртуальный прототип реального физического изделия, группы изделий или процесса, суть которого заключается в сборе и повторном использовании цифровой ин-

формации. При этом цифровой двойник не ограничивается сбором данных, полученных на стадии разработки и изготовления продукта. Он продолжает агрегировать данные в течение всего жизненного цикла объекта. Это могут быть данные о состоянии изделия, показатели датчиков, история операций, заводская (as-build) и сервисная (as-maintained) конфигурация, версия программного обеспечения и многое другое. Цифровой двойник хранит всю историю рабочих данных. Это даёт дополнительные возможности для технического обслуживания и позволяет увидеть всю картину целиком» [5].

Одними из лидеров этого направления применения цифровых технологий являются европейские концерны – Siemens, Groupe Dassault и другие.

Внимательное изучение этих цифровых технологий показало, что их корни заложены в давно известном понятии имитационного моделирования. Преимуществами цифровых двойников называют возможность исследования проектируемых продуктов при аварийных значениях параметров или возможность обучения персонала. Но это есть давно известные положительные черты имитационного моделирования. Конечно, новые технические возможности обусловили существенный прорыв в развитии имитационного моделирования, которые и вылились в появление понятия *цифровой двойник*.

В этих условиях автоматизация построения имитационных моделей значительно опережает АСНИ. Существует достаточно много программных комплексов, обеспечивающих автоматизацию процесса имитационного моделирования. Обзору этого класса программных средств, их применимости для решения задач имитационного моделирования технологических производственных процессов посвящена настоящая статья.



Назначение и структура средств имитационного моделирования

В настоящее время разработано значительное количество программных средств, обеспечивающих построение имитационных моделей и экспериментирование с ними. Еще больше средств визуализации и статистической обработки результатов.

Мы будем рассматривать только специальные программные средства, ориентированные на имитационное моделирование. Их основной чертой является наличие:

- графического редактора;
- встроенного языка программирования;
- библиотеки предметно-ориентированных элементов;
- средств анимации.

Этот набор инструментов является базовым. Отсутствие какого-либо из компонентов значительно снижает функциональные возможности программного инструментария имитационного моделирования. Как правило, АСПИМ являются достаточно дорогим программным продуктом, некоторые из них имеют академические версии.

Рассматривая средства построения имитационных моделей, классифицируем их на АСПИМ, ориентированные на предметную область моделирования или базирующиеся на определенном математическом аппарате. Следует отметить, что исследуемая система может накладывать определенные ограничения на инструментарий построения имитационных моделей, например, потребовать создания специальных библиотек элементов.

На интернет-ресурсе (<http://simulation.su/static/de-soft.print>) представлен обзор программных систем имитационного моде-

лирования, изучив которые несложно убедиться в справедливости указанного выше признака классификации.

Особо следует выделить в силу их универсальности и распространенности три АСПИМ: GPSS World (<http://www.gpss.ru/>), Arena (<https://www.arenasimulation.com>) и AnyLogic (<https://www.anylogic.ru>). Первая – это универсальная система имитационного моделирования, охватывающая весь цикл имитационных исследований, от постановки задачи до документирования результатов. Вторая позволяет создавать подвижные компьютерные модели, использование которых дает возможность адекватно представить очень многие реальные системы. Третья поддерживает следующие технологии создания имитационных моделей: процессно-ориентированную (дискретно-событийную), системно динамическую и агентную, а также любую их комбинацию. Универсальность обеспечивает возможности имитационного моделирования систем довольно разнообразного вида – экономических, транспортных, массового обслуживания и т.п. Но эта универсальность приводит к необходимости проведения дополнительных разработок, например, создания библиотек элементов исследуемых систем в случаях, когда разработчики не ориентированы на сложные в математическом, физическом или ином смысле объекты. Примеры построения имитационных моделей с помощью универсальных программных систем именно технологических производственных процессов достаточно трудно отыскать в литературе (только, например, в [6–8]). Одним из таких производственных процессов являются технологические процессы обогащения полезных ископаемых.

Технологические процессы обогащения полезных ископаемых

Обогащение полезных ископаемых – совокупность процессов механической переработки минерального сырья с целью извлечения ценных компонентов и удаления пустой породы и вредных примесей,

которые не представляют практической ценности в данных технико-экономических условиях. Технологии разделения минерального сырья на полезное и бесполезное, пока не используемое, основаны на



полутора десятках физических свойств – гравитационные свойства, размеры, магнитная восприимчивость, гидрофильность и гидрофобность, светимость и т.д. Для этого минеральное сырье измельчается до размеров от 5 мм до десятков микронов и с помощью воды транспортируется от одного обогатительного агрегата к другому. Примером сложности описания физико-химических процессов обогащения является флотация. Эта технология весьма распространена при обогащении многих видов минерального сырья и основана на способности частицы сырья прикрепиться или не прикрепиться к пузырьку воздуха, поднимающегося, по очевидным причинам, к поверхности во флотационной камере. И это трехфазная среда (жидкость – твердое – газ), имеющая место не только в обогащении полезных ископаемых, но и в химической, пищевой, фармацевтической промышленности, достаточно сложно описывается на языке, позволяющем построить имитационные модели – языке математики и физики.

Особенно важен динамический характер протекающих в обогатительных процессах явлений. В настоящее время работа любого аппарата или механизма,

любой технологической цепи описывается в статике. Это существенно облегчает разработку и исследование различных математических моделей [9–13]. Изучение кинетики процессов или динамики работы оборудования распространяется на частные элементы обогатительной технологии. Очевидны достоинства такого подхода, но очевидно также и то, что отказ от учета динамических свойств делает все исследования и получаемые при этом результаты справедливыми для некоторого идеального случая. Имеет место потеря адекватности моделей реальным объектам, снижается ценность рекомендаций для практики, страдает эффективность и экономика обогатительной отрасли.

Таким образом, исследование динамических свойств технологических процессов обогащения полезных ископаемых и использование этих свойств для решения частных задач оптимального синтеза качественно-количественных схем, применение цифровых технологий и аппарата имитационного моделирования обуславливает переход к системам автоматизированного проектирования схем технологических процессов обогащения.

Автоматизированный синтез имитационных моделей обогатительных технологий

Использование методологии системного анализа обеспечивает возможность проведения обширных предпроектных исследований с автоматизированным выбором наиболее эффективных схем обогащения, изготовлением необходимой проектной документации, обучением персонала работе в рамках проектируемого технологического процесса и решение многих других сопутствующих задач.

Достижение указанных целей связано с решением целого комплекса задач, включающего:

- разработку новых и привязку известных методов декомпозиции технологических схем с целью выделения и стандартизации их фрагментов;
- новых и привязку известных в дру-

гих областях знаний методов анализа как в целом схем обогащения, так и их фрагментов;

- методов автоматизированного синтеза имитационных моделей технологических схем на основе ранее исследованных и имитируемых фрагментов;

- методологии использования методов декомпозиции, анализа, имитации технологических схем процессов обогащения полезных ископаемых в процессе проектирования и эксплуатации как самого горно-обогатительного предприятия, так и автоматизированных систем управления различного типа.

В работе [1] представлены результаты теоретических исследований и описание автоматизированной системы построе-



ния имитационных моделей технологических обогатительных процессов. Там же приведено описание программного комплекса, реализующего данную систему, который подвергнут модернизации (http://www1.fips.ru/wps/portal/IPS_Ru#1534300372357, пп. 7–19).

Целью автоматизированной системы построения имитационных моделей технологических схем процессов обогащения полезных ископаемых является повышение эффективности проектирования технологических процессов обогащения, основанное на использовании как известных, но нетрадиционных для данной отрасли, для анализа и синтеза технологических схем, повышение эффективности обогатительных процессов как таковых, обучение проектировщиков и эксплуатационников в тех или иных условиях, аналогичных как реальным, так и неким гипотетическим ситуациям.

Исходными данными для автоматизированного синтеза имитационных моделей технологических схем служат: структуры схемы, заданные в таблицах инцидентности графа, описывающего имитируемую технологию; описания законов распределения вероятностей масс частиц в исходных продуктах; параметры имеющихся в схеме операций – длительность выполнения операций (время, затрачиваемой частицей продукта на прохождение пути от входа в аппарат до его выхода) и другие параметры, обеспечивающие вычисление вспомогательных величин (содержание, извлечение, выход продукта, экономические параметры и т.п.); сепарационные характеристики разделительных операций; описания законов распределения вероятностей физических свойств по меньшей мере для каждой разделительной операции, а также параметры, управляющие имитацией (длительность эксперимента и др.).

По структуре схемы и таблицам инцидентности (созданным посредством специального построителя технологических схем [14]) составляются динамические соотношения, в которых используются длительности выполнения технологических операций.

Для реализации имитационной модели эти соотношения являются основными.

На каждом такте (шаге) имитационного эксперимента по описаниям законов распределения вероятностей входных процессов с использованием методов генерирования случайных чисел осуществляется воспроизведение текущего значения физического свойства и соответствующего ему значения массы частиц.

Затем реализуется вычисление масс частиц во внутренних и выходных процессах с использованием соответствующих и найденных ранее динамических соотношений. При этом осуществляется синхронизация процессов по времени с использованием длительностей выполнения технологических операций.

Если ведется вычисление процессов на выходах разделительных операций, то перед этим вычислением по соответствующей сепарационной характеристике [1] и прогенерированному ранее значению физического свойства вычисляется текущее значение разделительного коэффициента. Для этого используется линейная или нелинейная интерполяция, если сепарационная характеристика задана таблично, или прямым счетом по формуле, если имеется такое задание сепарационной характеристики. Причем сама сепарационная характеристика задается конкретно для данного типа оборудования, так как конструктивные либо управляющие параметры оборудования заданы соответствующей зависимостью.

Текущее значение разделительного коэффициента определяет долю масс частиц, направляемых в концентрат, оставшаяся масса частиц направляется в хвосты.

После вычисления значений всех процессов схемы реализуется расчет параметров схемы (при возможности и экономических [14]). При этом используются традиционные для обогащения полезных ископаемых формулы расчета показателей.

В завершении шага эксперимента осуществляется запоминание исходных и вычисленных значений для последующей их статистической обработки, визуализации



и интерпретации.

С тем чтобы расширить исследования схем на таким образом созданных имитационных моделях, необходимо предусмотреть возможность задания различных по своему характеру возмущений во входных процессах.

Построенная таким образом имитационная модель важна не только для специалистов-обогащителей, но и имеет особое значение для специалистов в области автоматизированных систем управления технологическими процессами. Связано это с тем, что таким образом созданная имитационная модель важна для исследования чувствительности, устойчивости и тому подобных свойств систем управления. При-

меры использования автоматизированной системы построения имитационных моделей технологических схем процессов обогащения полезных ископаемых приведены в работе [1].

Следует обратить внимание на возможности применения данного программного комплекса не только для построения имитационных моделей технологических процессов обогащения полезных ископаемых, но и в других предметных областях. Сложность будет состоять в возможности составления описания операции, разделяющей потоки, то есть в нахождении пропорции распределения потоков между выходами операции.

Пример имитационной модели фрагмента обогащательной технологии

В отличие от универсальных программных систем автоматизированная система построения имитационных моделей технологических схем процессов обогащения полезных ископаемых не требует от пользователя специальных знаний в сфере программирования. Необходимо только наличие знаний предметной моделируемой области. Очевидно, что для пользователя необходимость владения непрофессиональными для него знаниями является важным критерием выбора системы создания имитационной модели. Проиллюстрируем справедливость этого тезиса на примере имитационной модели фрагмента технологического процесса обогащения полезных ископаемых, созданной в среде AnyLogic (академическая версия).

Имитируемый фрагмент (рис. 1) часто используется в учебной литературе, предназначенной для использования при подготовке будущих обогащителей.

В данном фрагменте первая разделительная операция P1 реализуется гидроциклоном ГЦ-500, а вторая операция, P2 – магнитным сепаратором 209 ВП-СЭ. Для улучшения сепарационных свойств используется доизмельчение материала (опера-

ция И) на мельнице МШР 3600x5500.

Включенные в систему модули, реализующие расчет текущих значений сепарационных характеристик для всех существующих типов разделительных операций, обеспечивают отсутствие требований к знанию языков программирования.

Известно [1], что сепарационная характеристика гидроциклона при постоянной плотности разделения имеет вид:

$$\varepsilon_{p1}(l) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \operatorname{tanh} \left[\left[\frac{v_{cp}}{D} + \frac{a \cdot (\rho_0 - \rho_{cp}) \cdot l^2}{\alpha_c \cdot D} \right] \cdot \frac{h}{4} \right] \right\},$$

где l – крупность материала; v_{cp} – средняя радиальная скорость течения (оттока от стенки) пульпы; D – коэффициент макродиффузии минеральных частиц; a – напряженность поля центробежных сил; ρ_{cp} – плотность среды; ρ – плотность разделения; α_c – коэффициент трения; h – толщина пристенного слоя.

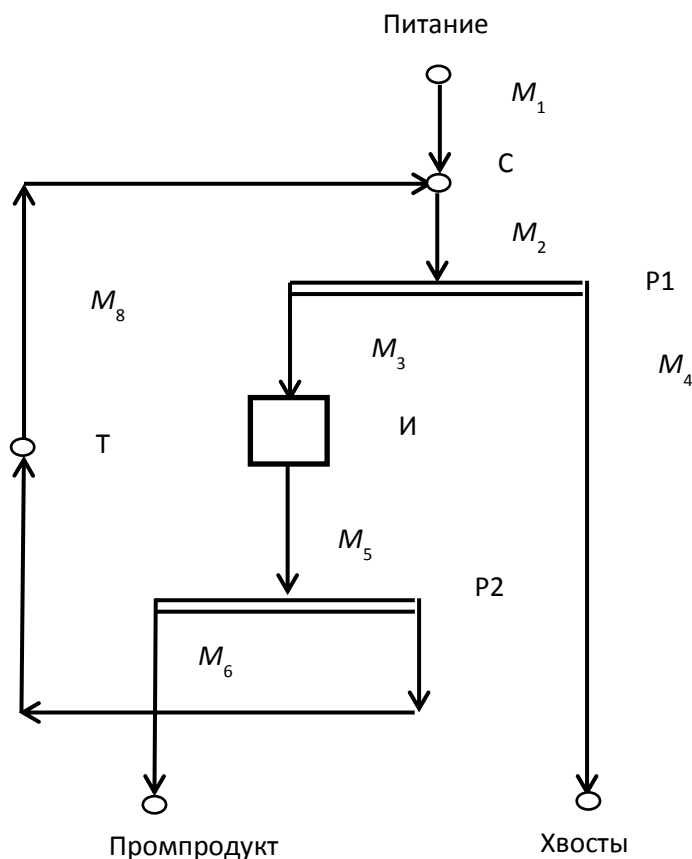


Рис. 1. Фрагмент технологической схемы
Fig. 1. Fragment of the technological scheme

Сепарационная характеристика магнитного сепаратора при постоянной плотности сред имеет вид [1]:

$$\varepsilon_{p2}(\chi) = \frac{1}{2} \cdot \left\{ 1 + \Phi \left[(\chi - \chi_p) \cdot \sqrt{\frac{h \cdot a \cdot \gamma_{исх}(\chi)}{\alpha \cdot D}} \right] \right\},$$

где χ – магнитная восприимчивость; Φ – функция распределения вероятностей нормального закона распределения вероятностей (интеграл вероятностей); χ_p – магнитная восприимчивость; h – глубина постели, $a = H \cdot \text{grad}(H)$; H – напряженность магнитного поля; $\alpha \cdot D$ – коэффициент диффузии; $\gamma_{исх}(\chi)$ – распределение масс частиц по магнитной восприимчивости во входном потоке.

На рис. 2 представлена имитационная модель фрагмента технологической

схемы, построенной в среде AnyLogic.

Для моделирования задаются переменные и константы, используемые в модели. Результаты выводятся в графической форме.

На рис. 3 приведено описание свойств гидроциклона.

В части свойств «Действия» приведены записанные на языке Java (как предписывает AnyLogic) формулы для расчета текущего значения гидроциклона (Pgidro) и текущих значений на выходах гидроциклона, исчисленных с учетом рассчитанного значения сепарационной характеристики (QGhv и QGko).

Использование AnyLogic требует от пользователя знания языка программирования и навыков работы в этой программной среде. Это, очевидно, не приемлемо для специалиста-обогащателя, проектирующего технологический процесс обогащения полезных ископаемых.

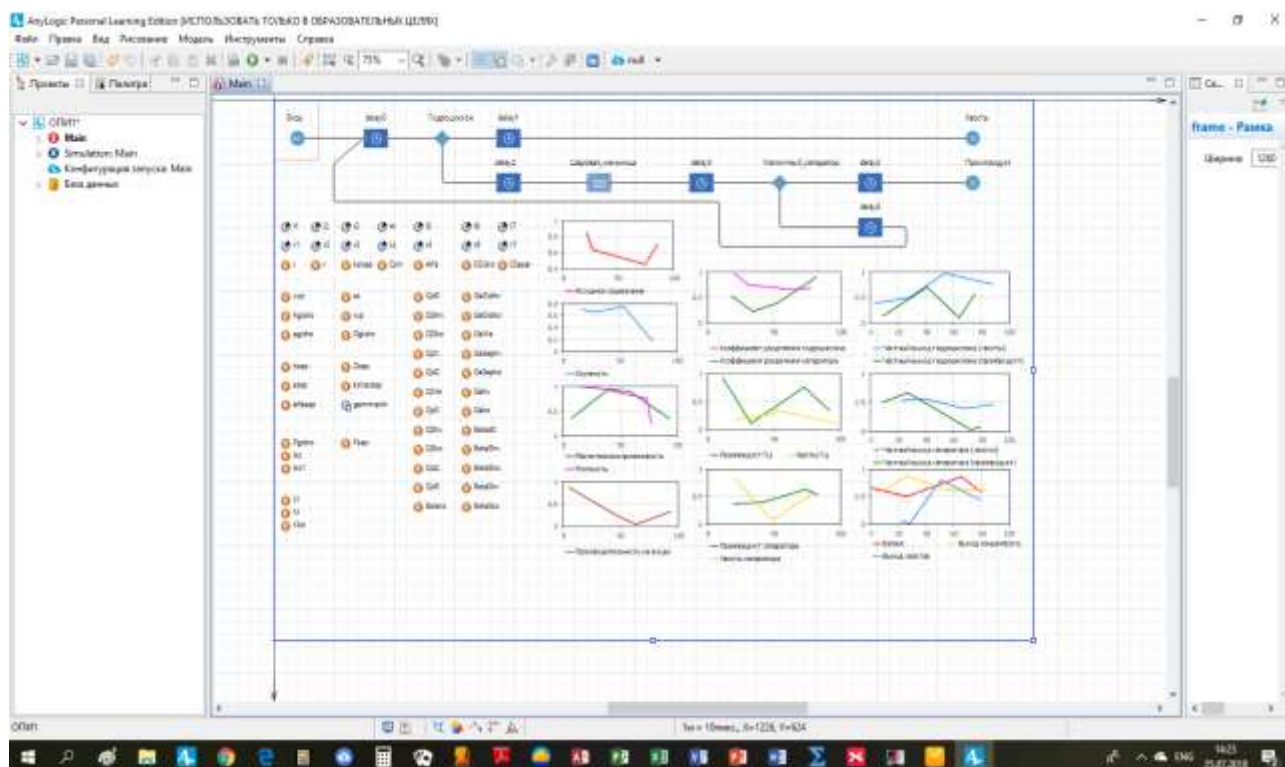


Рис. 2. Имитационная модель фрагмента технологической схемы в среде AnyLogic
Fig. 2. Simulation model of a technological scheme fragment in the AnyLogic environment

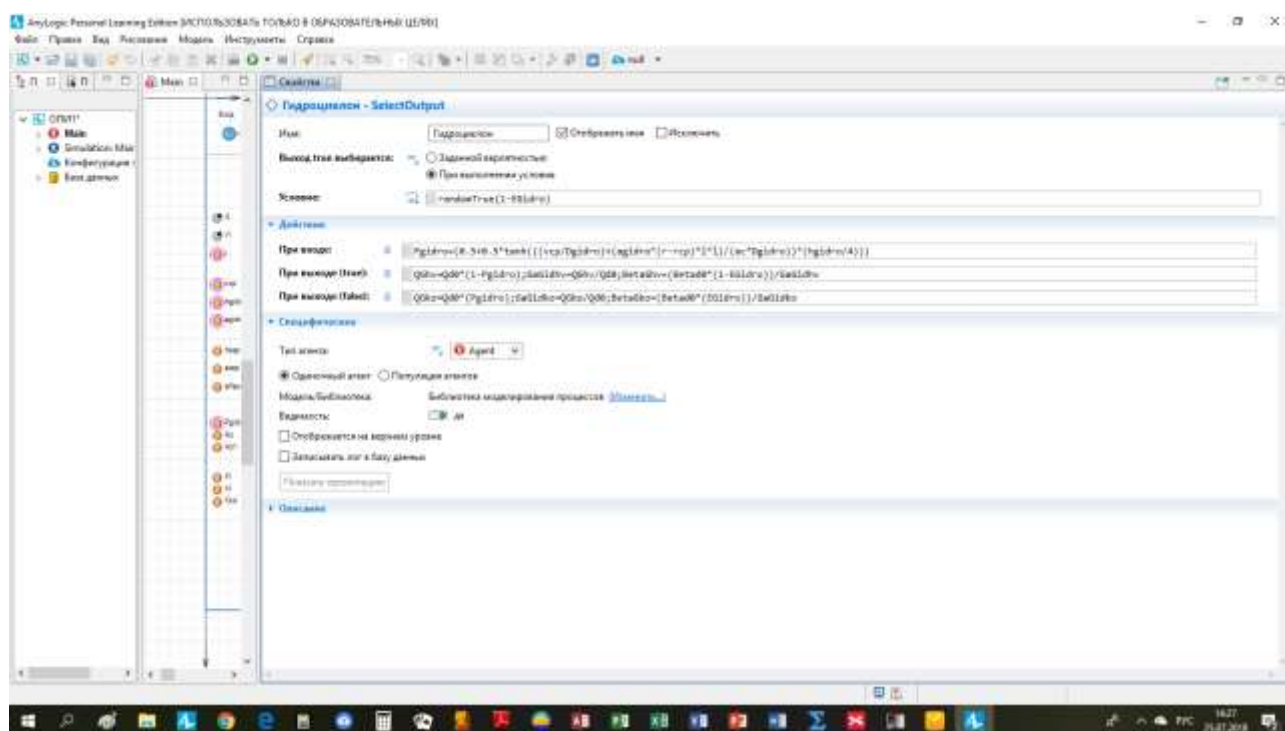


Рис. 3. Окно свойств гидроциклона
Fig. Window of hydrocyclone properties



Выводы

Таким образом, анализ существующих программных продуктов, решающих задачу автоматизации построения имитационной модели и способных моделировать технологические производственные процессы, позволяет сделать вывод, что

универсальность не является ключевым параметром при выборе программного продукта. Главным является ориентация на требования и возможности пользователя имитационной модели.

Библиографический список

1. Леонов С.Б., Петров А.В. Имитационное моделирование технологических процессов обогащения полезных ископаемых. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 1996. 242 с.
2. Krouse J.K. What Every Engineer Should Know About Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing: The CAD/CAM Revolution. New York; Basel: Marcel Dekker, 1982.
3. Боровков А.И., Бурдаков С.Ф., Клявин О.И., Мельникова М.П., Михайлов А.А., Немов А.С., Пальмов В.А., Силина Е.Н. Компьютерный инжиниринг. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 93 с.
4. Новая парадигма цифрового проектирования и моделирования глобально конкурентоспособной продукции нового поколения [Электронный ресурс] // CML (CompMechLab). Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ. URL: <http://fea.ru/news/6721> (09.07.2018).
5. Что такое цифровой двойник и для чего он нужен? [Электронный ресурс] // Dassault Systemes в России и странах СНГ. Блог о технологиях и инновациях в промышленности. URL: <http://blogs.3ds.com/russia/digital-twin> (09.07.2018).
6. Боев В.Д. Концептуальное проектирование систем в AnyLogic и GPSS World. М.: Национальный Открытый Университет «ИНТУИТ», 2016, 543 с.
7. Рябов И.М., Гудков Д.В., Исаков А.К., Кашманов Р.Я. Анализ и сравнение программного обеспечения для моделирования транспортных процессов на предприятии [Электронный ресурс]. URL: <http://euroasia-science.ru/tehnicheskie-nauki/analiz-i-sravnenie-programmnogo-obespecheniya-dlya-modelirovaniya-transportnykh-processov-na-predpriyatii> (09.07.2018).
8. Якимов И.М., Кирпичников А.П., Трусфус М.В., Мокшин В.В. Сравнение систем структурного и имитационного моделирования AnyLogic, Extendsim, Simulink // Вестник Технологического университета. 2017. Т. 20. № 15. С. 118–122.
9. Мальков М.В., Олейник А.Г., Федоров А.М. Моделирование технологических процессов: методы и опыт // Труды Кольского научного центра РАН. 2010. Вып. 3. С. 93–101.
10. Кандинская И.В., Удовичкий В.И., Сывороткин А.Н. Математическое моделирование технологических процессов на обогатительной фабрике «Распадская» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. № S7. С. 96–100.
11. Ламберг П. Моделирование технологий обогащения с помощью программного продукта HSC Chemistry на основе данных о степени раскрытия минералов // Цветные металлы. 2011. № 10. С. 98–104.
12. Машевский Г.Н., Романенко С.А. Математическая модель процесса перемещения цикла флотации медных колчеданных руд // Обогащение руд. 2014. № 4 (352). С. 27–33.
13. Fandrich R., Gu Y., Burrows D., Moeller K. Modern SEM-based mineral liberation analysis // Int. J. Miner. Process. 2007. Vol. 84. P. 310–320.
14. Нгуен Ван Чи, Петров А.В. Экономическая модель технологических процессов обогащения полезных ископаемых // Вестник ИрГТУ. 2010. № 5 (45). С. 16–21.

References

1. Leonov S.B., Petrov A.V. *Imitatsionnoe modelirovanie tekhnologicheskikh protsessov obogashcheniya poleznykh iskopaemykh* [Simulation modeling of technological processes of mineral processing]. Irkutsk: IrGTU Publ., 1996, 242 p. (In Russian)
2. Krouse J.K. What Every Engineer Should Know About Computer-Aided Design and Computer-Aided Manufacturing: The CAD/CAM Revolution. New York; Basel: Marcel Dekker, 1982.
3. Borovkov A.I., Burdakov S.F., Klyavin O.I., Melnikova M.P., Mikhailov A.A., Nemov A.S., Pal'mov V.A., Silina E.N. *Komp'yuternyi inzhiniring* [Computer engineering] Saint-Petersburg: Politechnical university Publ., 2012, 93 p. (In Russian)
4. *Novaya paradigma tsifrovogo proektirovaniya i modelirovaniya global'no konkurentosposobnoi produktsii novogo pokoleniya* [A new paradigm for digital design and modeling of globally competitive products of the new generation]. Available at: <http://fea.ru/news/6721> (accessed 9 July 2018).
5. Chto takoe tsifrovoy dvoynik i dlya chego on nuzhen? [What is a digital twin and what is it for?]. Available at: <http://blogs.3ds.com/russia/digital-twin> (accessed 9 July 2018).



6. Boev V.D. *Kontseptual'noe proektirovanie sistem v AnyLogic i GPSS World* [Conceptual design of systems in AnyLogic and GPSS World]. Moscow: National Open University "INTUIT" Publ., 2016, 543 p. (In Russian)
7. Ryabov I.M., Gudkov D.V., Iskakov A.K., Kashmanov R.Ya. *Analiz i sravnenie programmnogo obespecheniya dlya modelirovaniya transportnykh protsessov na predpriyatii* [Analysis and comparison of software for modeling of transportation processes at the enterprise]. Available at: <http://euroasia-science.ru/tehnicheskie-nauki/analiz-i-sravnenie-programmnogo-obespecheniya-dlya-modelirovaniya-transportnykh-processov-na-predpriyatii> (accessed 09 July 2018)
8. Yakimov I.M., Kirpichnikov A.P., Trusfus M.V., Mokshin V.V. [Comparison of structural and simulation modeling systems AnyLogic, Extendsim, Simulink]. *Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University]. 2017, vol. 20, no. 15, pp. 118–122. (In Russian)
9. Mal'kov M.V., Oleinik A.G., Fedorov A.M. Modeling of technological processes: methods and experience // *Trudy Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Kola Science Center RAS]. 2010, issue 3,

pp. 93–101. (In Russian)

10. Kandinskaya I.V., Udovitskii V.I., Syvorotkin A.N. Mathematical simulation of technological processes at the concentrating plant "Raspadskaya". *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'* (nauchno-tekhnicheskii zhurnal) [Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal)]. 2009, no. S7, pp. 96–100. (In Russian)
11. Lamberg P. Beneficiation technologies simulation with the HSC chemistry software using data on the mineral liberation extent// *Tsvetnye metally* [Non-ferrous Metals]. 2011, no. 10, pp. 98–104. (In Russian).
12. Mashevskii G.N., Romanenko S.A. Mathematical model of the cleaning cycle of flotation of copper pyrite ores. *Obogashchenie rud* [Ore Concentration]. \ 2014, no. 4 (352), pp. 27–33. (In Russian)
13. Fandrich R., Gu Y., Burrows D., Moeller K. Modern SEM-based mineral liberation analysis // *Int. J. Miner. Process.* 2007, vol. 84, pp. 310–320.
14. Nguen Van Chi, Petrov A.V. Economic model of the technological processes of mineral concentration/ *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2010, no. 5 (45), pp. 16–21. (In Russian)

Критерии авторства

Петров А.В. полностью подготовил статью и несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Petrov A.V. has prepared the article for publication and bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.65, 614.841.42

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-111-120>

РАЗРАБОТКА МЕТОДА ОПЕРАТИВНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ РАЗВИТИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА ПОСРЕДСТВОМ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ГЛУБОКОГО МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

© Т.С. Станкевич¹

Калининградский государственный технический университет,
236022, Российская Федерация, г. Калининград, Советский проспект, 1.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ данной работы состоит в повышении эффективности оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара при нестационарности и неопределенности посредством разработки метода оперативного прогнозирования на базе искусственного интеллекта (Artificial Intelligence) и глубокого машинного обучения (Deep Machine Learning). **МЕТОДЫ.** Для решения поставленной задачи использованы методы системного анализа, методы теории нейронных сетей и глубокое машинное обучение. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Для обеспечения формирования эффективного оперативного прогноза в сложных условиях (в условиях неопределенности и нестационарности) разработан метод оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара, предполагающий построение и настройку свёрточной нейронной сети – СНС (или Convolutional neural network – CNN). В работе описана общая логическая схема предлагаемого метода. Для построения и настройки сети использованы: данные о пожаре, полученные в режиме реального времени с помощью сканирующих радиометров MODIS и VIIRS, установленных на метеоспутниках; данные о факторах окружающей среды, характере лесных насаждений и виде пожара. **ВЫВОДЫ.** Разработанный метод оперативного прогнозирования на базе искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения позволяет выполнить анализ визуальных данных и выявить ключевые зависимости распространения лесного пожара от факторов внешней среды, характера лесных насаждений и вида пожара.

Ключевые слова: лесной пожар, оперативное прогнозирование, искусственный интеллект, глубокое машинное обучение, свёрточная нейронная сеть, метод прогнозирования, неопределенность, нестационарность.

Информация о статье. Дата поступления 13 июля 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Станкевич Т.С. Разработка метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 111–120. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120

DEVELOPMENT OF OPERATIONAL PREDICTION METHOD OF FOREST FIRE DYNAMICS BASED ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND DEEP MACHINE LEARNING

T.S. Stankevich

Kaliningrad State Technical University,
1, Sovetskiy pr., Kaliningrad, 236022, Russian Federation

ABSTRACT. PURPOSE. The purpose of the present research is to increase the efficiency of operational prediction of forest fire dynamics under nonstationarity and uncertainty through the development of the operational prediction method based on Artificial Intelligence and Deep Machine Learning. **METHODS.** The methods of system analysis, neural networks, and deep machine learning are used to solve the set problem. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** To ensure the formation of an effective operational prediction in the complex conditions of uncertainty and nonstationarity a method for operational prediction of forest fire dynamics has been developed. It consists in building and training of the convolu-

¹Станкевич Татьяна Сергеевна, кандидат технических наук, доцент кафедры защиты в чрезвычайных ситуациях, начальник отдела организации научно-исследовательской работы студентов, e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru
Tatiana S. Stankevich, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Safety in Emergency Situations, Head of the Department of Students' Research Work Organization, e-mail: tatiana.stankevich@klgtu.ru



tional neural network (CNN). The paper describes the general logical scheme of the proposed method. CNN construction and setting is performed on the basis of the following data: the real-time fire data from the satellites using MODIS and VIIRS, data on environmental factors, data on the type of forest plantations and the type of fire. **CONCLUSIONS.** The developed operational prediction method based on Artificial Intelligence and Deep Machine Learning allows to analyze visual data and reveal the key dependences of forest fire propagation on the environmental factors, the type of forest plantations and the type of fire.

Keywords: forest fire, operational prediction, artificial intelligence, deep machine learning, convolutional neural network (CNN), prediction method, uncertainty, nonstationarity

Information about the article. Received July 13, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018

For citation. Stankevich T.S. Development of operational prediction method of forest fire dynamics based on artificial intelligence and deep machine learning. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 111–120. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-111-120 (In Russian)

Введение

В настоящее время общемировая проблема обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности лесов, направленная на реализацию устойчивого развития человечества во взаимодействии с окружающей средой, является остроактуальной. Решение данной проблемы имеет важное значения для Российской Федерации, которая в силу географического положения значительно подвержена опасности возникновения лесных пожаров.

Согласно статическим данным Рослесхоза [1], с 2009 по 2017 гг. наблюдается увеличение площади лесных земель, пройденной пожарами. Так, в 2009 г. площадь лесных земель, пройденная пожарами, составила ~ 2,6 млн га, в 2017 г. – ~ 3,3 млн га, увеличение составило 27,92%. Анализ статистических данных за период с 2013 по 2017 гг. показал также рост расходов на охрану, защиту, воспроизводство лесов, расположенных на землях лесного фонда. В 2013 г. данный тип расходов составил ~ 30343,8 млн руб., а в 2017 г. – 37116,8 тыс. руб., рост составил 22,32%. При этом выше указанная динамика показателей наблюда-

ется при параллельном снижении общего количества лесных пожаров в России: за период с 1992 по 2017 гг. зафиксировано снижение в 2,36 раза – с 25777 случаев в 1992 г. до 10922 случаев в 2017 г.

Природные пожары в Российской Федерации являются угрозой национальной безопасности страны, негативно влияя на экономику государства и на экологическую обстановку как в стране, так и в мире.

Одним из направлений решения проблемы обеспечения необходимого уровня пожарной безопасности лесов является совершенствование процесса прогнозирования динамики развития лесных пожаров.

Цель данной работы состоит в повышении эффективности оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара при нестационарности и неопределенности посредством разработки метода оперативного прогнозирования на базе искусственного интеллекта (Artificial Intelligence) и глубокого машинного обучения (Deep Machine Learning).

Обоснование необходимости разработки метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара на базе искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения

Как показал всесторонний анализ современных отечественных и зарубежных источников в области прогнозирования лесных пожаров [2–10], для формирования прогноза лесного пожара активно исполь-

зуются как в России, так и в мире (США, Канаде, Австралии, Западной Европе) волновые (эллиптические), статистические и имитационные модели лесного пожара. На базе волновых моделей построены такие



системы прогнозирования динамики лесных пожаров, как «Прометей» [6] и FlamMap [8]. Примером применения статических моделей является модель, представленная в работе [10]. Имитационная модель лежит в основе системы прогнозирования динамики пожара FARSITE [7].

В ходе анализа функциональных особенностей моделей прогнозирования лесного пожара проведено сравнение данных типов моделей по следующим критериям: точность прогноза; временные затраты на построение модели; временные затраты на построение прогноза; вычислительная сложность построения прогноза; универсальность модели; функционирование в условиях неопределенности и нестационарности.

Получены следующие результаты:

- *волновые модели* характеризуются: относительно высокой точностью прогноза; относительно высокими временными затратами на построение модели; средними временными затратами на построение прогноза; относительно высокой вычислительной сложностью построения прогноза; универсальностью модели; ограниченной функциональностью в условиях неопределенности и нестационарности;

- *имитационные модели* имеют: относительно высокую точностью прогноза; относительно высокие временные затраты на построение модели; средние временные затраты на построение прогноза; относительно высокую вычислительную сложность построения прогноза; универсальность; ограниченную функциональность в условиях неопределенности и нестационарности;

- *статистические модели* обладают: средней точностью прогноза; относительно высокими временными затратами на построение модели; относительно низкими временными затратами на построение прогноза; относительно низкой вычислительной сложностью построения прогноза; не обладают универсальностью; ограничено функционируют в условиях неопределенности и нестационарности.

Как видим, существующие традици-

онные модели прогнозирования лесного пожара (волновые, имитационные, статистические) имеют ряд существенных недостатков. Анализ данных результатов позволяет сделать вывод, что хотя данные модели лесных пожаров широко применяются на практике, их использование ограничено в условиях оперативного прогнозирования.

В настоящее время наблюдается стремительное развитие таких областей информационных технологий, как искусственный интеллект, системы обработки больших объемов данных (Big Data) и глубокое машинное обучение. Рассмотренные информационные технологии являются высокоэффективным инструментом для решения широкого перечня задач, которые относятся к слабоформализуемым или неформализуемым. Поскольку распространение пожара относится к типу слабоформализуемых процессов, что обусловлено неустойчивостью и недостаточной изученностью механизмов физико-химических процессов горения, то применение данных перспективных информационных технологий направлено на обеспечение возможности формирования оперативного прогноза.

Существующие на данный момент модели прогнозирования динамики развития с использованием нейросетевых технологий (например, представленные в работах [11, 12]) устраняют часть недостатков, присущих традиционным моделям. Однако нейросетевые модели имеют трудности в практическом применении в связи со сложностью и трудоемкостью построения архитектуры сети с последующей настройкой, скрытым характером функционирования сети и др.

С учетом вышеизложенного автором настоящей статьи разработан метод оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством применения перспективных информационных технологий – искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения. Данный метод предназначен для повышения эффективности оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара при нестационарности и неопределенности.

Обоснование выбора свёрточной нейронной сети как элемента метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара

В процессе разработки метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара в сложных условиях (при неопределенности и нестационарности) предложено использовать свёрточную нейронную сеть.

Согласно [13–16] суть функционирования сети данного типа, представляющей собой один из методов глубокого машинного обучения, заключается в осуществлении последовательности переходов от конкретных особенностей входных данных к более абстрактным деталям до понятий высокого уровня. Особенностью архитектуры сети, представленной на рис. 1, является чередование свёрточных (C-layers), субдискретизирующих (S-layers) и полносвязных (F-layers) слоев на выходе.

При этом ключевым слоем сети является свёрточный слой, где выполняется операция свёртки. В свёрточном слое ядро свёртки (матрица весов, являющаяся ограниченной и имеющая небольшой размер)

обрабатывает слой (для первого этапа в качестве обрабатываемого слоя используется входное изображение) и производит формирование сигнала активации после каждого сдвига. Сигнал активации передается на нейрон следующего слоя, имеющий соответствующее размещение. Благодаря обучению сети (наиболее распространенным методом обучения является метод обратного распространения ошибки) выполняется определение весовых коэффициентов ядра свёртки. После выполнения операции свёртки формируется карта признаков, демонстрирующая наличие и координаты признака в обрабатываемом слое.

Субдискретизирующий слой предназначен для уменьшения размерности карт признаков, сформированных предыдущим слоем сети. Данный слой выполняет выбор максимального нейрона из ряда соседних нейронов карты признаков, выбранный нейрон в дальнейшем заменяет всю рассматриваемую совокупность нейронов.

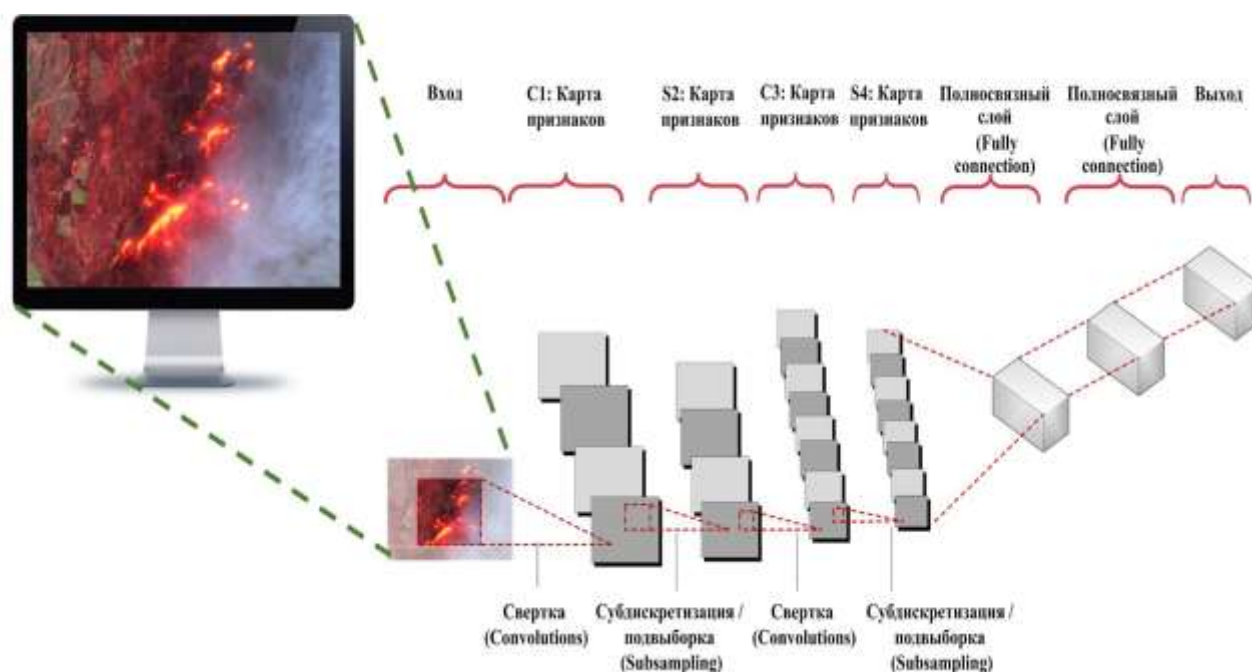


Рис. 1. Общий вид архитектуры свёрточной нейронной сети для формирования оперативного прогноза

Fig. 1. General view of the convolution neural network (CNN) architecture for operational prediction formation



Полносвязный слой сети позволяет осуществить формирование полносвязной нейронной сети из абстрактных понятий, извлеченных из входного изображения.

Выбор свёрточной нейронной сети для решения задачи оперативного прогнозирования лесного пожара в сложных условиях при дефиците времени обусловлен достоинствами данного типа сетей.

Согласно [13–16] основными достоинствами сетей данного типа является их высокая точность и оперативность выполнения расчетов. Так, в соответствии с [16], при распознавании образов и изображений наилучшие возможные скорости распознавания достигнуты с использованием свёрточных нейронных сетей: 99,77% – с использованием базы данных рукописных цифр MNIST; 97,47% – с использованием набора данных трехмерных объектов NORB; 97,6% – с использованием более 5600 изображений с более чем 10 объектами. Производительность свёрточных нейронных сетей, как указано в работе [16], существенно превосходит производительность других алгоритмов распознавания объектов и изображений. Кроме того, в ряде задач результаты сети превосходят результаты, демонстрируемые людьми.

Также свёрточные нейронные сети характеризуются [13–16]: устойчивостью; возможностью увеличения производительности вычислений за счет распараллеливания; нетребовательностью к входным данным (требуется минимальная обработка входных данных); способностью производить самонастройку и самостоятельно определять иерархии абстрактных признаков с целью последующего определения ключевых деталей и др.

В настоящее время область применения свёрточных нейронных сетей многообразна. Как указано в [16], изначально данный тип многослойных искусственных нейронных сетей был разработан Яном Лекунем для решения проблемы вариативности 2D-фигур. Затем благодаря своим неоспоримым достоинствам сети стали применяться для классификации изображений, для автоматического распознавания речи и др.

С учетом вышеизложенного предлагается использовать свёрточную нейронную сеть для анализа визуальных данных и последующего выявления зависимостей влияния факторов окружающей среды, характера лесных насаждений и вида пожара на динамику развития лесного пожара.

Метод оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара на базе искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения

Общая логическая схема разработанного метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара при неопределенности и нестационарности на базе искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения представлена на рис. 2.

Предложенный метод основан на использовании данных из системы управления ресурсами (FIRMS) [17], которая предоставляет данные о распространении пожара в режиме реального времени (NRT) в течение 3 часов со спутника как с помощью спектрорадиометра с умеренным разрешением (MODIS, спутники Terra и Aqua),

так и с помощью видимого инфракрасного рентгенограммного набора (VIIRS). Методом также предусмотрено использование данных о факторах окружающей среды, данных о характере лесных насаждений и данных о виде пожара. Пример визуальных данных приведен на рис. 3.

Для оптимизации работы с собранными визуальными данными выполнено построение соответствующей базы данных, которая непрерывно пополняется. В настоящее время планируется защитить результаты интеллектуальной деятельности посредством подачи заявки на государственную регистрацию базы данных.

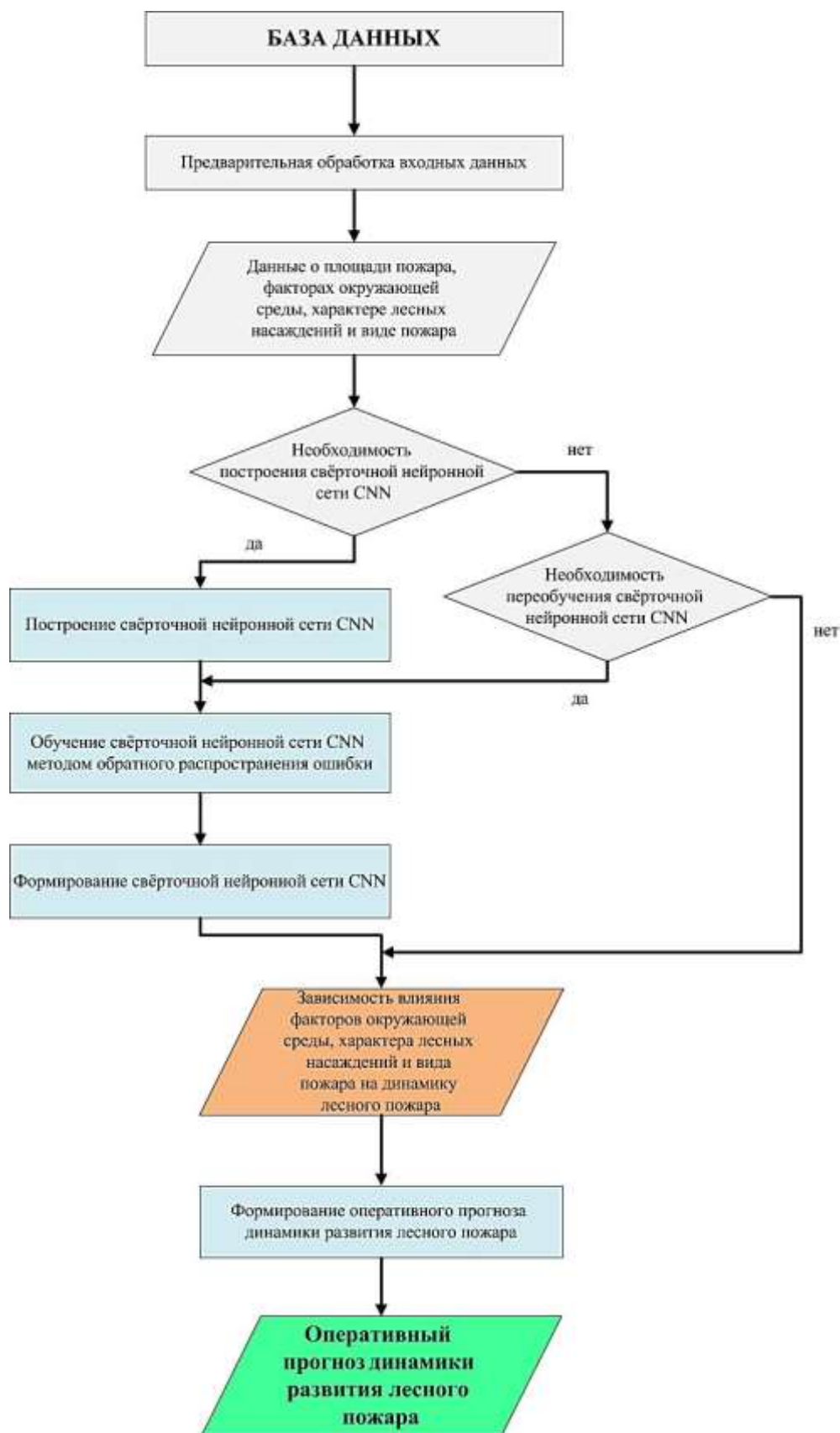


Рис. 2. Общая логическая схема метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара на базе искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения
Fig. 2. General block diagram of the method of forest fire dynamics operational prediction based on Artificial Intelligence and Deep Machine Learning

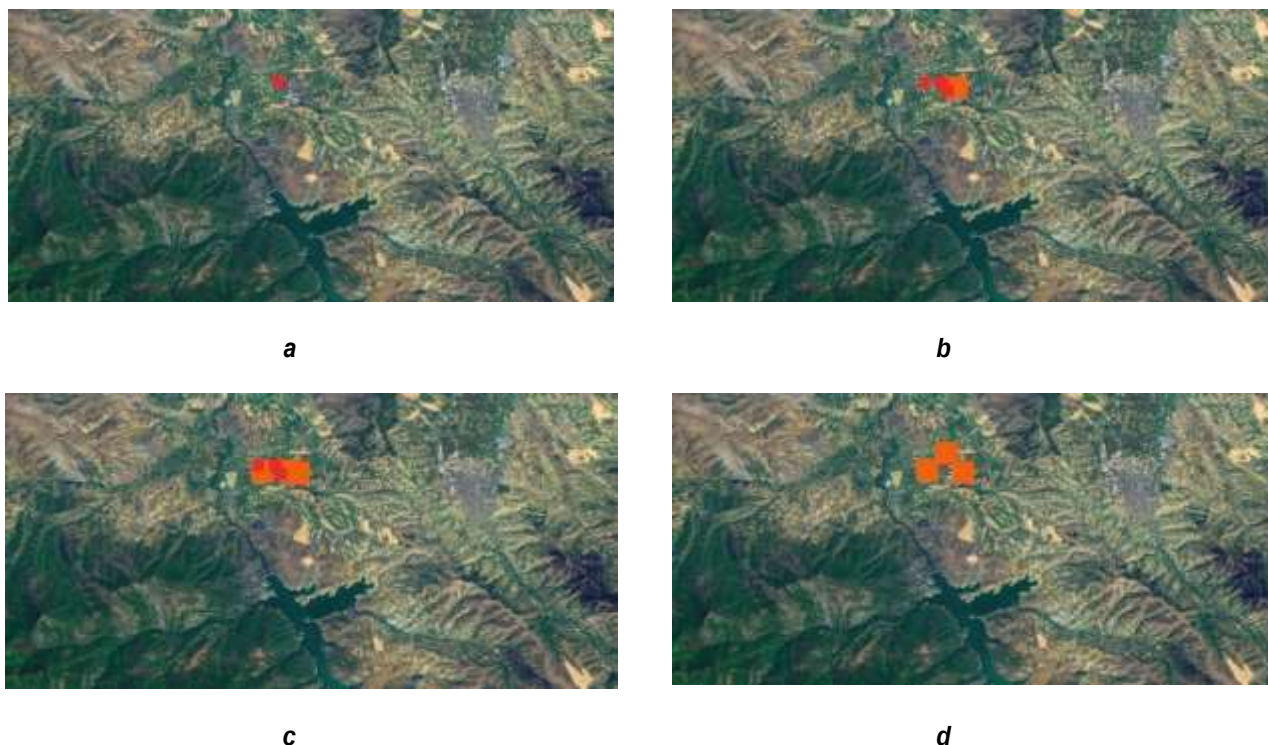


Рис. 3. Космоснимок территории, охваченной лесным пожаром:
a – 18:24 GMT, 04.05.2018; VIRS 375 m; b – 11:12 GMT, 05.05.2018; VIRS 375 m;
c – 09:06 GMT, 06.05.2018; VIRS 375 m; d – 15:36 GMT, 07.05.2018; VIRS 375 m
Fig. 3. A space image of the forest fire area:
a – 18:24 GMT, 4 May 2018; VIRS 375 m; b – 11:12 GMT, 5 May 2018; VIRS 375 m;
c – 09:06 GMT, 6 May 2018; VIRS 375 m; d – 15:36 GMT, 7 May 2018; VIRS 375 m

Метод оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара при неопределенности и нестационарности на базе искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения включает последовательное выполнение следующих шагов:

первый этап – формирование базы визуальных данных о динамике развития лесных пожаров, о факторах окружающей среды, характере лесных насаждений и виде пожара;

второй этап – предварительная обработка данных для исключения из дальнейшей обработки искаженных элементов входного изображения;

третий этап (реализуется в случае отсутствия ранее сформированной сверточной нейронной сети или необходимости ее изменения) – построение и/или настройка сверточной нейронной сети;

четвертый этап – построение оперативного прогноза динамики развития лесного пожара посредством применения

моделей распространения лесного пожара.

Суть разработанного метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара заключается в формировании оперативного прогноза путем применения моделей распространения лесного пожара на базе сверточной нейронной сети. Для построения адекватных моделей распространения лесного пожара необходима разработка адекватных сетей. Качество построения и обучения сети зависит от набора данных для построения и обучения сети.

Главной особенностью предложенного метода является необходимость проведения анализа значительного количества визуальных данных с целью выявления зависимостей влияния факторов окружающей среды, характера лесных насаждений и вида пожара на динамику развития лесного пожара путем применения сверточной нейронной сети.



Таким образом, для обеспечения формирования эффективного оперативного прогноза в сложных условиях (в условиях неопределенности и нестационарности)

разработан метод оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения.

Заключение

На основании полученных результатов можно сформулировать следующие выводы:

1. Обоснована необходимость разработки метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара, учитывающего влияние факторов окружающей среды, характера лесных насаждений и вида пожара при нестационарности и неопределенности с использованием перспективных информационных технологий – искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения. Существующие традиционные модели прогнозирования лесного пожара (волновые, имитационные и статистические модели) имеют ряд существенных недостатков, что делает их малоприменимыми для оперативного прогнозирования в сложных условиях.

2. Обоснован выбор свёрточной нейронной сети как элемента метода оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара. За счет ряда достоинств свёрточных нейронных сетей (высокой производительности, низких временных затрат на формирование решения, устойчивости, способности решать слабоформализуемые или неформализуемые задачи)

их применение для формирования оперативного прогноза лесного пожара при дефиците времени в условиях неопределенности и нестационарности является перспективным.

3. Разработан метод оперативного прогнозирования динамики развития лесного пожара посредством применения искусственного интеллекта и глубокого машинного обучения. Предлагаемый метод, как наглядно видно на общей логической схеме, представленной на рис. 2, включает четыре этапа: формирование базы визуальных данных; предварительная обработка данных; построение и/или настройка сети; построение оперативного прогноза динамики развития лесного пожара. Разработанный метод оперативного прогнозирования позволяет выполнить анализ визуальных данных о динамике лесных пожаров и выявить основные зависимости распространения лесного пожара от факторов внешней среды, характера лесных насаждений и вида пожара.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-37-00035 «мол_а».

Библиографический список

1. Единая межведомственная информационно-статистическая система (ЕМИСС) [Электронный ресурс]. URL: <https://fedstat.ru/> (30.05.2018).
2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск: Наука, 1992. 404 с.
3. Масленников Д.А., Катаева Л.Ю. Моделирование лесных пожаров в трехмерной системе координат с учетом рельефа // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4 (5). С. 2338–2340.
4. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения и распространения верховых лесных пожаров в осредненной постановке // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 2. С. 24–30.

5. Рылкова О.И., Катаева Л.Ю., Масленников Д.А., Романова Н.А., Рылков И.В., Лошилов А.А. Численное моделирование лесного пожара в лесах Высокоборского лесничества Борского района Нижегородской области [Электронный ресурс] // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11671> (30.05.2018).
6. Welcome to FireGrowthModel.ca [Электронный ресурс]. URL: <http://firegrowthmodel.ca> (30.05.2018).
7. Farsite [Электронный ресурс]. URL: <https://www.firelab.org/project/farsite> (30.05.2018).
8. Finney M.A., Andrews P.L., Butler B.W., comps. An overview of FlamMap fire modeling capabilities [Электронный ресурс] // Proceedings RMRS-P-41. 2006.



pp. 213–220. URL:

https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p041/rmrs_p041_2_13_220.pdf (30.05.2018).

9. Ходаков В.Е., Жарикова М.В. Лесные пожары: методы исследования. Херсон: Гринь Д.С., 2011. 470 с.

10. Source Code for the EMBYR Wildfire Simulation Model [Электронный ресурс]. URL:

<https://www.geobabble.org/~hnm/embyr/> (30.05.2018).

11. Коморовский В.С., Доррер Г.А. Методика расчета параметров лесных пожаров как динамических процессов на поверхности земли с использованием данных космического мониторинга // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2010. № 3. С. 47–50.

12. Ясинский Ф.Н., Потёмкина О.В., Сидоров С.Г., Евсеева А.В. Прогнозирование вероятности возникновения лесных пожаров с помощью нейросетевого алгоритма на многопроцессорной вычислительной технике // Вестник Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина. 2011. № 2. С. 82–84.

13. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks [Электронный ресурс]. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012. 9 p. URL:

<https://www.cs.toronto.edu/~fritz/absps/imagenet.pdf> (30.05.2018).

14. LeCun Y. LeNet-5, convolutional neural networks [Электронный ресурс]. URL:

<http://yann.lecun.com/exdb/lenet/> (02.04.2018).

15. Aghdam H.H., Heravi E.J. Guide to Convolutional Neural Networks. A Practical Application to Traffic-Sign Detection and Classification. Springer International Publishing, 2017. 282 p.

16. Hijazi S., Kumar R., and Rowen C. Using Convolutional Neural Networks for Image Recognition [Электронный ресурс]. Cadence IP-Group, White Paper, 2015. 12 p. URL:

https://ip.cadence.com/uploads/901/cnn_wp-pdf (30.05.2018).

17. Fire Information for Resource Management System (FIRMS) [Электронный ресурс]. URL:

<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#z:3.0;c:44.286,17.596> (30.05.2018).

References

1. *Edinaya mezhvedomstvennaya informacionno-statisticheskaya sistema (EMISS)* [The Single unified inter-department statistical information system (SUISIS)]. Available at: <https://fedstat.ru/> (accessed 30 May 2018).

2. Grishin A.M. *Matematicheskoe modelirovanie lesnykh pozharov i novye sposoby bor'by s nimi* [Mathematical modeling of forest fires and new firefighting approaches]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1992, 405 p. (In Russian)

3. Maslennikov D.A., Kataeva L.Yu. Modeling forest fires in a three-dimensional coordinate system based on topography. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo* [Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod]. 2011, no. 4 (5), pp. 2338–2340. (In Russian)

4. Perminov V.A. Mathematical simulation of forest fire occurrence and propagation in an averaged setting. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki* [Journal of Technical Physics]. 2015, vol. 85, no. 2, pp. 24–30. (In Russian)

5. Rylkova O.I., Kataeva L.Yu., Maslennikov D.A., Romanova N.A., Rylkov I.V., Loshchilov A.A. Numerical modeling of forest fires in forests of Vysokoborsky forestry Borskiy district of Nizhny Novgorod region. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2013, no. 6. Available at: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=11671> (accessed 30 May 2018).

6. Welcome to FireGrowthModel.ca. Available at: <http://firegrowthmodel.ca> (accessed 30 May 2018).

7. Farsite. Available at: <https://www.firelab.org/project/farsite> (accessed 30 May 2018).

8. Finney M.A., Andrews P.L., Butler B.W., comps. An

overview of FlamMap fire modeling capabilities. Proceedings RMRS-P-41. 2006. pp. 213–220. Available at: https://www.fs.fed.us/rm/pubs/rmrs_p041/rmrs_p041_2_13_220.pdf (accessed 30 May 2018).

9. Khodakov V.E., Zharikova M.V. *Lesnye pozhary: metody issledovaniya* [Forest Fires: Research Methods]. Kherson: Grin' D.S. Publ., 2011, 470 p. (In Russian)

10. Source Code for the EMBYR Wildfire Simulation Model. Available at:

<https://www.geobabble.org/~hnm/embyr/> (accessed 30 May 2018).

11. Komorovskii V.S., Dorrer G.A. Method of calculation of parameters of forest fires, as dynamic processes in the earth surface based on space monitoring data. *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva* [Scientific Journal of Science and Technology]. 2010, no. 3, pp. 47–50. (In Russian)

12. Yasinskii F.N., Potemkina O.V., Sidorov S.G., Evseeva A.V. Prognosticating probability of fire with connectionist algorithm on multiprocessor computer. *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta im. V.I. Lenina* [Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University]. 2011. № 2. С. 82–84. Available at: http://ispu.ru/files/str.82-84_0.pdf (accessed 30 May 2018).

13. Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G. ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. Advances in Neural Information Processing Systems, 2012. 9 p. Available at:

<https://www.cs.toronto.edu/~fritz/absps/imagenet.pdf> (accessed 30 May 2018).

14. LeCun, Y. LeNet-5, convolutional neural networks.



Available at: <http://yann.lecun.com/exdb/lenet/> (accessed 30 May 2018).

15. Aghdam H.H., Heravi E.J. Guide to Convolutional Neural Networks. A Practical Application to Traffic-Sign Detection and Classification. Springer International Publishing, 2017. 282 p.

16. Hijazi S., Kumar R., and Rowen C. Using Convolutional Neural Networks for Image Recognition. Cadence

IP-Group, White Paper, 2015. 12 p. Available at: https://ip.cadence.com/uploads/901/cnn_wp-pdf (accessed 30 May 2018).

17. Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Available at: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#z:3.0;c:44.286,17.596> (accessed 30 May 2018).

Критерии авторства

Станкевич Т.С. провела исследование, подготовила статью к публикации и несет ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Stankevich T.S. 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 622.33.013:004.416 «311»

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-121-132>

ИМИТАЦИОННЫЕ МОДЕЛИ В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ВОСТОЧНЫХ РЕГИОНОВ РОССИИ

© Л.Н. Такайшвили¹

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

РЕЗЮМЕ. Вычислительный эксперимент при исследовании перспектив развития угледобывающих регионов достаточно трудоемкий и слабоформализуемый, что связано с особенностями угольной промышленности как объекта исследования. В статье представлены имитационные модели, разработанные в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН для исследования перспектив развития угольной промышленности России и, в частности, ее восточных регионов. Модели реализованы в рамках информационно-модельного комплекса (ИМПК) «Уголь». **ЦЕЛЬ.** Рассмотрение возможности реализации названных имитационных моделей для исследования перспектив развития угольной промышленности. **МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ.** В исследованиях использованы методы системного анализа, оценки инвестиционных проектов принятия решений в условиях неопределенности. Для верификации моделей использованы официальные статистические данные и прогнозы развития экономики регионов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Представлена реализация имитационных моделей: модели, предназначенные для оценки инвестиционных проектов предприятий и групп предприятий и три типа балансовых моделей. Модели могут использоваться совместно с оптимизационными производственно-транспортными моделями и самостоятельно. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Сложная структура объекта исследования, трудность формализации зависимостей показателей развития угольной промышленности от отдельных наиболее значимых факторов, преобладающая роль эксперта в исследованиях не позволяют применять компьютерные модели с фиксированным входом и выходом. Имитационное моделирование является эффективным инструментом исследования перспектив развития угольной промышленности регионов России. С использованием представленных моделей неоднократно выполнялся компьютерный эксперимент, подтвердивший рациональность и оправданность применения этих моделей.

Ключевые слова: моделирование, вычислительный эксперимент, имитационная модель, угольная промышленность, восточные регионы России, исследование, добыча, потребление.

Информация о статье. Дата поступления 05 июля 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Такайшвили Л.Н. Имитационные модели в исследованиях перспектив развития угольной промышленности восточных регионов России // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 121–132. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-121-132

SIMULATION MODELS IN THE STUDIES OF COAL INDUSTRY DEVELOPMENT IN THE EASTERN REGIONS OF RUSSIA

L.N. Takaishvili

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation

ABSTRACT. When studying the development prospects of coal-mining regions, the use of a computational experiment is rather labor-intensive, moreover, it is difficult to formalize. This is due to the features of coal industry as an object of research. The article presents the simulation models constructed at Melentiev Energy Systems Institute SB RAS in order to study the development prospects of Russian coal industry as a whole and the eastern regions of Russia in particular. The models are implemented in the framework of the information and model complex (IMPC) Coal. **PURPOSE.** The purpose of the paper is to consider the possibility of implementing the simulation models in order to study the development pro-

¹Такайшвили 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



spects of the coal industry. **MATERIAL AND METHODS.** The study uses the methods of system analysis, evaluation of investment projects, decision-making under conditions of uncertainty. Official statistical data and forecasts of regional economy development are used for model verification. **RESULTS.** The paper presents the simulation models being implemented including the models designed to evaluate investment projects of enterprises and groups of enterprises and 3 types of balance models. The models can be used independently or together with optimization production and transport models. **CONCLUSION.** The complex structure of the research object, the complexity of formalizing the dependencies of coal industry development indices on individual, most significant factors, the prevailing role of an expert in research do not allow to use the computer models with the fixed input and output. Simulation modeling is an effective tool for studying coal industry development prospects in the regions of Russia. The repeated computer experiment on the basis of the presented models has proved the rationality and feasibility of their use.

Keywords: modeling, computing experiment, simulation model, coal industry, Eastern regions of Russia, research, mining, consumption

Information about the article. Received July 5, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Takaishvili L.N. Simulation models in the studies of coal industry development in the eastern regions of Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 121–132. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-121-132 (In Russian)

Введение

Угольная промышленность страны является одной из больших систем энергетики в составе топливно-энергетического комплекса (ТЭК) [1–3]. Основными свойствами угольной промышленности как большой системы энергетики являются: структурная сложность, масштабность и инерционность [4]. Угольной продукции присущи: неоднородность продукта, обусловленная широким диапазоном изменения качественных характеристик; множество направлений использования; слабая востребованность и взаимозаменяемость (технологические установки рассчитаны на уголь определенного качества). Все это находит отражение в моделях, предназначенных для исследования развития и функционирования угольной промышленности. Вычислительный эксперимент достаточно трудоемкий и слабоформализуемый, что связано с особенностями угольной промышленности как объекта исследования [4]. При выполнении вычислительного эксперимента зарубежными и российскими учеными используются оптимизационные и имитационные модели, разработанные для исследования как отдельных процессов, связанных с технологиями добычи и переработки угля, так и функционирования предприятий, регионов и отрасли в целом во взаимодействии с другими отраслями экономики [5–8]. Из зарубежного опыта моделирования развития угольной промышленности наиболее всеобъемлющей, учитывающей множество связей угольной промышленности с отраслями экономики и внутреннюю структуру, является угольный блок в национальной системе моделирования энергетики США – модель NEMS [5]. Реализованы также модели функционирования угольной промышленности Польши, Южной Африки, Австралии и другие [5–8].

Российский опыт моделирования развития угольной промышленности насчитывает более 70 лет [9–12]. В Институте энергетических исследований (ИНЭИ) РАН разработана система имитационных моделей, позволяющая выявить наиболее эффективные направления развития отрасли исходя из прогнозируемых вариантов развития экономики России [10]. В Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ) СО РАН исследования и прогнозирование развития угольной промышленности страны и регионов в ТЭК ведутся более 40 лет [12]. В исследованиях используются оптимизационные и имитационные модели. Угледобывающие регионы России имеют существенные отличия по своим характеристикам, в том числе условиям добычи угля, поставок и прочим. Большинство основных угледобывающих предприятий страны расположены в восточных регионах – в Сибири и на Дальнем Востоке, на которые приходится более 95% объемов добычи. Для исследования развития угледобычи в восточных регионах России разработаны имитационные модели, представленные в данной статье.



Инструментарий для исследования перспектив развития угольной промышленности

При исследовании перспектив развития угольной промышленности решаются следующие задачи:

1. Анализ существующего состояния угольной отрасли.
2. Разработка сценариев развития экономики (страны или региона).
3. Прогноз потребности в электро- и теплоэнергии.
4. Прогноз потребности в топливе в зависимости от принятого сценария.
5. Прогноз востребованных объемов добычи, объемов и направлений поставок угля с

учетом:

- сложившихся тенденций добычи, поставок, потребления доступных ресурсов угля;
 - возможностей транспортной инфраструктуры и других факторов.
6. Прогноз развития топливных отраслей на основе балансов топлива.

Непосредственно к исследованиям перспектив развития угольной промышленности относятся задачи 1 и 5.

Для задач исследования развития угольной отрасли в ИСЭМ СО РАН выполнена интеграция информационной базы и системы взаимосвязанных моделей в информационно-модельном комплексе (ИМК) «Уголь», в состав которого входят информационная система и система моделей. Реализованы три вида моделей: имитационные, расчетные и оптимизационные, формулируемые в виде задач линейного программирования. Представленные модели могут использоваться как вместе, так и каждая самостоятельно, в зависимости от постановки задачи исследования. С использованием одной модели может решаться несколько задач. С использованием оптимизационных моделей можно получить прогнозы, требующие доработки. Для доработки результатов решения наиболее подходят имитационные модели. Решение формируется при непосредственном участии эксперта, при этом возможно учесть большую часть особенностей функционирования и развития процессов добычи и потребления угля. На начало исследования, как правило, существует неопределенность в составе доступных исходных данных, объеме и алгоритме предварительных расчетов показателей. Исходная информация, доступная на начало исследования, и уникальность объектов угольной промышленности не позволяют создать инструментарий для имитационных моделей с зафиксированными входом и выходом. Специфика научных исследований такова, что практически для каждого из них создавались свои имитационные модели на основе разработанных ранее.

Имитационные модели для исследования развития угольной промышленности

Реализовано 4 вида имитационных моделей, соответствующих разным уровням и аспектам рассмотрения: «INVEST COAL», «Балансы», «Балансы регионов» и «Субъект Федерации».

Модель «INVEST COAL» разработана для оценки экономической эффективности функционирования и развития предприятия или группы предприятий. С использованием этой модели может решаться также обратная задача – определение цены угля или других показателей при заданном показателе эффективности. В модели рассчитываются: балансовая прибыль; чистая прибыль; рентабельность продукции и поток денежной наличности; выручка от реализации продукции. В издержки производства на добычу угля входят затраты на электроэнергию, теплоэнергию, материалы, оплату труда, амортизация, налоги, услуги промышленного характера; выплата процентов за кредит и прочие расходы. Критериальными показателями являются: состояние текущего счета; дисконтированный текущий счет; чистая текущая стоимость; индекс прибыльности; рентабельность продукции; внутренняя норма доходности и срок возврата капитала. Для повышения надежности получаемых оценок выполняется анализ устойчивости, представляющий собой расчет зависимости обобщающих финансово-экономических показателей от тех или иных изменений исходных параметров проекта (рис. 1).

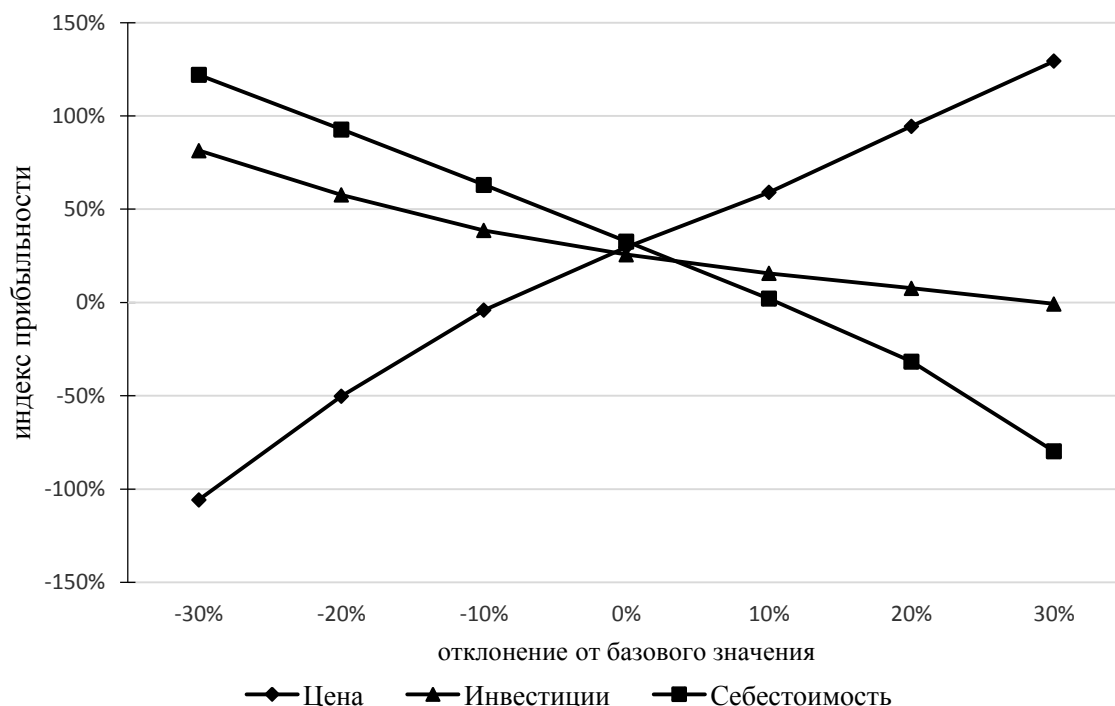


Рис. 1. Зависимость индекса прибыльности от отклонений исходных параметров от базовых значений

Fig. 1. Dependence of the profitability index on input parameter deviation from basis values

Модели «Балансы», «Балансы регионов» и «Субъект Федерации» отличаются детализацией представления объектов и некоторыми другими аспектами, не имея существенных различий по структуре.

Модели одного и того же типа, создаваемые для конкретных исследований, отличаются в зависимости от объема доступной информации и целей исследования. В качестве субъектов рынка, в зависимости от степени детализации, выступают угли, угледобывающие и углелеперабатывающие предприятия, регионы. В качестве региона рассматриваются субъекты Федерации (СФ), федеральные округа (ФО), экспорт как обобщенный регион, Российская Федерация в целом или другие территориальные образования, объединенные по какому-либо признаку. Связи между субъектами рынка представлены объемами поставок и затратами на транспортировку. Поставки и потребление угля прогнозируются с учетом сложившихся тенденций поставок и потребления угля в регионах России и поставок на экспорт.

Модель «Балансы» позволяет на основе данных о потенциальных возможностях добычи углей и потребностей в углях получить прогноз востребованных объемов добычи и поставок углей по федеральным округам.

Модель «Балансы регионов» является дополнением к оптимизационной производственно-транспортной модели угольной промышленности России и модели «Балансы». В качестве версии поставок угля в регионы, от которой начинается поиск решения, может служить решение, полученное с помощью этих моделей.

Модель «Субъект Федерации» предназначена для исследования развития угольной промышленности на уровне СФ. В ней представлена наиболее полная детализация показателей: по угледобывающим предприятиям, обогатительным фабрикам, потреблению определенных углей в разрезе СФ и с учетом деления СФ по каким-либо признакам (административным, транспортной доступности и др.) и т.п.



Структура имитационных моделей

В имитационных моделях «Балансы», «Балансы регионов» и «Субъект Федерации» выделены три функциональных блока: «Производство», «Потребление» и «Балансы угля». В блоках «Производство» и «Потребление» реализованы схемы расчета и распределения товарной продукции. Конечной товарной продукцией являются ресурсы угля для энергетики и коксовый концентрат. Товарная продукция поставляется на экспорт и для внутреннего потребления (электростанции, котельные, коксохимические заводы, прочие потребители).

Блок «Производство». Входные данные структурируются соответствующим образом для получения выходных данных. В них также содержится информация об объемах добычи угля, поступающих на обогатительные фабрики (ОФ) (коксующиеся и энергетические отдельно), о коэффициентах выхода товарной продукции и отходов на обогатительных фабриках. Информация об объемах добычи является выходными данными, которые структурируются по следующим признакам: объемы добычи угля на шахтах, разрезах, действующих и новых предприятиях; объемы добычи угля по районам; объемы добычи по видам углей: бурый, каменный (энергетический, коксующийся); объемы товарной продукции по продуктам (коксовый концентрат, энергетический концентрат, промпродукт, отходы); объемы добычи, поступающие потребителю в рядовом виде для бурого и каменного углей. Возможно структурирование и по другим признакам, например, группам предприятий, выделенных по территориальному или административному критерию.

В экономико-математической формулировке учитываются: районирование территории; добыча угля по видам (бурый, каменный, коксующийся); переработка на обогатительных фабриках; поставки внутри субъекта Федерации и в другие регионы России, по направлениям использования (электростанции, коксохимические заводы, население и др.) и на экспорт.

В частных случаях отдельные компоненты могут отсутствовать.

Объемы добычи угля в субъекте Федерации определяются по следующей формуле:

$$D_{sf}^t = \sum_{r=1}^R \left(\sum_{n=1}^N (D_{rnk}^t + D_{rn\delta}^{t\text{ кам}} + D_{rn\delta}^{t\text{ б}}) + \sum_{a=1}^A (D_{rak}^t + D_{ra\delta}^{t\text{ кам}} + D_{ra\delta}^{t\text{ б}}) \right), \quad (1)$$

где D_{sf}^t – объем добычи углей sf -субъекта Федерации в t -ом периоде; sf – индекс субъекта Федерации ($sf = 1, \dots, SF$), где SF – число субъектов Федерации; t – индекс периода времени ($t = 1, \dots, T$), где T – число периодов; r – индекс района в субъекте Федерации ($r = 1, \dots, R$), где R – число районов; n – индекс нового предприятия ($n = 1, \dots, N$), где N – число новых предприятий; a – индекс действующего предприятия ($a = 1, \dots, A$), где A – число действующих предприятий.

Объемы добычи угля в r -ом районе в t -ом периоде складываются из составляющих:

D_{rnk}^t – объем добычи коксующихся углей на новом предприятии n ;

$D_{rn\delta}^{t\text{ кам}}$ – объем добычи каменных энергетических углей на новом предприятии n ;

$D_{rn\delta}^{t\text{ б}}$ – объем добычи бурых энергетических углей на новом предприятии n ;

D_{rak}^t – объем добычи коксующихся углей на действующем предприятии a ;

$D_{ra\delta}^{t\text{ кам}}$ – объем добычи каменных энергетических углей на действующем предприятии a ;

$D_{ra\delta}^{t\text{ б}}$ – объем добычи бурых энергетических углей на действующем предприятии a ;

Также выделяются предприятия по способу добычи (открытый, подземный). Формула (1) дает представление о возможной структуре добычи. Для отдельных регионов некоторые составляющие будут равны нулю.



Потребителям поставляется товарная продукция, которая включает продукты обогащения углей: коксовый и энергетический концентрат, промпродукт (низкосортный продукт переработки углей) и угли, поступающие в рядовом виде потребителям (бурые и каменные).

Объемы товарной продукции определяются по формуле:

$$T_{sf}^t = \sum_{r=1}^R \left(\sum_{f=1}^F (T_{f\kappa}^t + T_{f\varepsilon}^t + T_{f\Pi\Pi}^t) + \sum_{n=1}^A (D_{rn\varepsilon p}^t + D_{rn\kappa p}^t) + \sum_{a=1}^A (D_{ra\varepsilon p}^t + D_{ra\kappa p}^t) \right), \quad (2)$$

где f – индекс обогатительной фабрики в субъекте федерации ($f=1, \dots, F$), где F – число обогатительных фабрик; $D_{rn\varepsilon p}^t, D_{rn\kappa p}^t, D_{ra\varepsilon p}^t, D_{ra\kappa p}^t$ – коксующийся (κ) и энергетический (ε) уголь, поставляемый в рядовом виде (p) с новых (n) и действующих (a) предприятий.

Товарную продукцию после переработки на обогатительных фабриках можно представить следующими уравнениями:

$$T_{f\kappa}^t = \alpha_{f\kappa\kappa} * (D_{n\kappa}^{tnep} + D_{a\kappa}^{tnep}); \quad (3)$$

$$T_{f\varepsilon}^t = \beta_{f\varepsilon\kappa} * (D_{n\varepsilon}^{tnep} + D_{a\varepsilon\kappa}^{tnep} + D_{a\varepsilon\delta}^{tnep}); \quad (4)$$

$$T_{f\Pi\Pi}^t = \alpha_{f\Pi\Pi\Pi} * (D_{n\kappa}^{tnep} + D_{a\kappa}^{tnep}) + \beta_{f\Pi\Pi\Pi} * (D_{n\varepsilon}^{tnep} + D_{a\varepsilon\kappa}^{tnep} + D_{a\varepsilon\delta}^{tnep}), \quad (5)$$

где $\alpha_{f\kappa\kappa}, \beta_{f\varepsilon\kappa}, \alpha_{f\Pi\Pi\Pi}, \beta_{f\Pi\Pi\Pi}$ – коэффициенты выхода коксового концентрата, энергетического концентрата и промпродукта на ОФ при переработке угля нового (n) или действующего (a) предприятия. Символами $T_{f\kappa}^t, T_{f\varepsilon}^t$ и $T_{f\Pi\Pi}^t$ обозначены соответствующие объемы выхода товарной продукции. $D_{n\kappa}^{tnep}, D_{a\kappa}^{tnep}, D_{n\varepsilon}^{tnep}, D_{a\varepsilon}^{tnep}$ – объемы добычи, поставляемые на переработку ($пер$) с новых (n) и действующих (a) предприятий.

Объемы товарной продукции подразделяются на ресурсы энергетического и коксующегося углей. Для получения баланса между потребностью и добычей ресурсы энергетического угля в тоннах натурального топлива $R_{sf}^{\varepsilon t}$ (6) переводятся в тонны условного топлива $R_{ysf}^{\varepsilon t}$ (7), по соответствующим калорийным эквивалентам Q_r^t . Ресурсы энергетического угля в натуральном исчислении (6) состоят из объемов продуктов переработки на ОФ: энергетический концентрат и промпродукт (низкосортные продукты переработки коксующихся и энергетических углей) и объемов добычи угля (бурого и каменного), поступающего потребителю в рядовом виде.

$$R_{sf}^{\varepsilon t} = \sum_{r=1}^R (T_{f\varepsilon}^t + T_{f\Pi\Pi}^t + D_{rn\varepsilon p}^{t\kappa\kappa\kappa} + D_{rn\varepsilon}^{t\delta} + D_{ra\varepsilon}^{t\delta}); \quad (6)$$

$$R_{ysf}^{\varepsilon t} = \sum_{r=1}^R (Q_{r\varepsilon\kappa}^t * T_{r\varepsilon\kappa}^t + Q_{r\Pi\Pi}^t * T_{r\Pi\Pi}^t + Q_{rn\varepsilon p}^{t\kappa\kappa\kappa} * D_{rn\varepsilon p}^{t\kappa\kappa\kappa} + Q_{rn\varepsilon}^{t\delta} * D_{rn\varepsilon}^{t\delta} + Q_{ra\varepsilon}^{t\delta} * D_{ra\varepsilon}^{t\delta}). \quad (7)$$

Блок «Потребление». Потребление угля включает внутреннее потребление угля для рассматриваемого региона, потребность в угле других регионов РФ и стран – импортеров угля. Потребители в регионах РФ объединяются по группам: потребители энергетического (объекты энергетики и другие) и коксующегося угля (металлургические заводы). Потребители энергетического угля группируются по направлению использования угля: электростанции, ко-



тельные, коммунально-бытовые и прочие потребители [5]. В блоке «Потребление» учитывается потребность в обязательных поставках на объекты энергетики.

Блок «Балансы угля». Получение балансов угля связано с поиском востребованных объемов добычи и поставок углей с учетом определенного критерия развития. Обобщенное балансовое уравнение имеет вид

$$T_{sf}^t + B_{sf}^t = P_{sf}^t + V_{sf}^t, \quad (8)$$

где T_{sf}^t – товарная продукция sf -того субъекта федерации в t -ом периоде; B_{sf}^t – ввоз в sf -й субъект федерации в t -ом периоде; P_{sf}^t – внутреннее потребление sf -субъекта федерации в t -ом периоде; V_{sf}^t – вывоз из sf -го субъекта федерации в t -ом периоде.

В балансовом уравнении (8) представлено соотношение ресурсов к распределению (суммы объемов товарной продукции, получаемой в регионе, и объемов ввоза угля в регион) и суммы прогнозируемых объемов потребления и объемов вывоза в другие регионы и на экспорт.

Уравнения составляются и решаются для коксующихся и энергетических углей отдельно. Для энергетических углей расчет выполняется в условном исчислении. Для получения востребованных объемов добычи и поставок углей в натуральном исчислении выполняется расчет, обратный представленному в уравнении (7). Балансы энергетических и коксующихся углей в натуральном исчислении сводятся в общий баланс угля. Уравнение (8) представлено для субъекта Федерации, точно такие же уравнения будут для всех уровней административной структуры страны: районы в субъекте Федерации, СФ, ФО, страна в целом.

Процесс нахождения балансов угля – итерационный. На первом этапе в блоке «Балансы» определяется разность между левой и правой частями уравнения (8) и, в зависимости от полученных результатов, выполняется одно или несколько действий.

1. В случае, когда потребность больше, чем ресурсы угля:

- рассматривается возможность увеличения мощностей добывающих действующих предприятий или ввода новых мощностей;
- рассматривается возможность сокращения поставок на экспорт и в другие регионы;
- рассматривается возможность удовлетворения потребности за счет ввоза из других регионов;
- экспертам рекомендуется сократить потребность в угле на объектах (например, сдвинуть сроки ввода мощностей на объектах энергетики).

2. В ситуации, когда ресурсы энергетического угля больше, чем потребность в энергетическом угле, необходимо:

- сократить объемы переработки угля;
- сократить объемы добычи угля;
- сдвинуть на более поздний период ввод новых мощностей по добыче угля.

Кроме представленного необходим также анализ соответствия потребности в определенных углях возможностям добычи (получения товарного продукта) этого угля, так как на объектах энергетики взаимозаменяемости углей практически не существует.

На следующем этапе возвращаемся в блоки «Производство» или «Потребность» для корректировки условий развития и далее итерационно получаем решение.

Поскольку процесс исследования слабоформализуемый, то возможны и другие действия эксперта в зависимости от конкретного объекта исследования.

Существует неопределенность в исходной информации как по возможностям добычи угля, так и по прогнозу потребления угля. Способ преодоления неопределенности – вариантный подход, т.е. решение находится для нескольких возможных сценариев развития экономики региона.



Реализация и использование имитационных моделей

Имитационные модели реализованы в электронных таблицах MS EXCEL, что дает следующие преимущества:

- возможность нетрудоемко настраивать, адаптировать модели к конкретным исследованиям, вводить алгоритмы расчета показателей, формировать таблицы результатов в соответствии с потребностями исследователя и т.п.;
- возможность провести вычисления, не предусмотренные заранее, потребовавшиеся в ходе исследований;
- результаты расчетов обрабатываются и представляются в виде таблиц и графиков, пригодных для помещения в печатный материал (статьи, монографии, отчеты), что существенно экономит время подготовки материалов.

На рис. 2 представлены фрагменты имитационных моделей «INVEST COAL», разработанных для разных исследований предприятий восточных регионов России. С использованием модели «INVEST COAL» решались прямая и обратная задачи для разрезов Мугунский, Харанорский, Солнцевский, предприятия Востсибуголь и других. Универсальность подхода позволила адаптировать эту модель для исследования других объектов энергетики: ГРЭС на угле и газе; Вилуйская и Богучанская ГЭС и т.п.

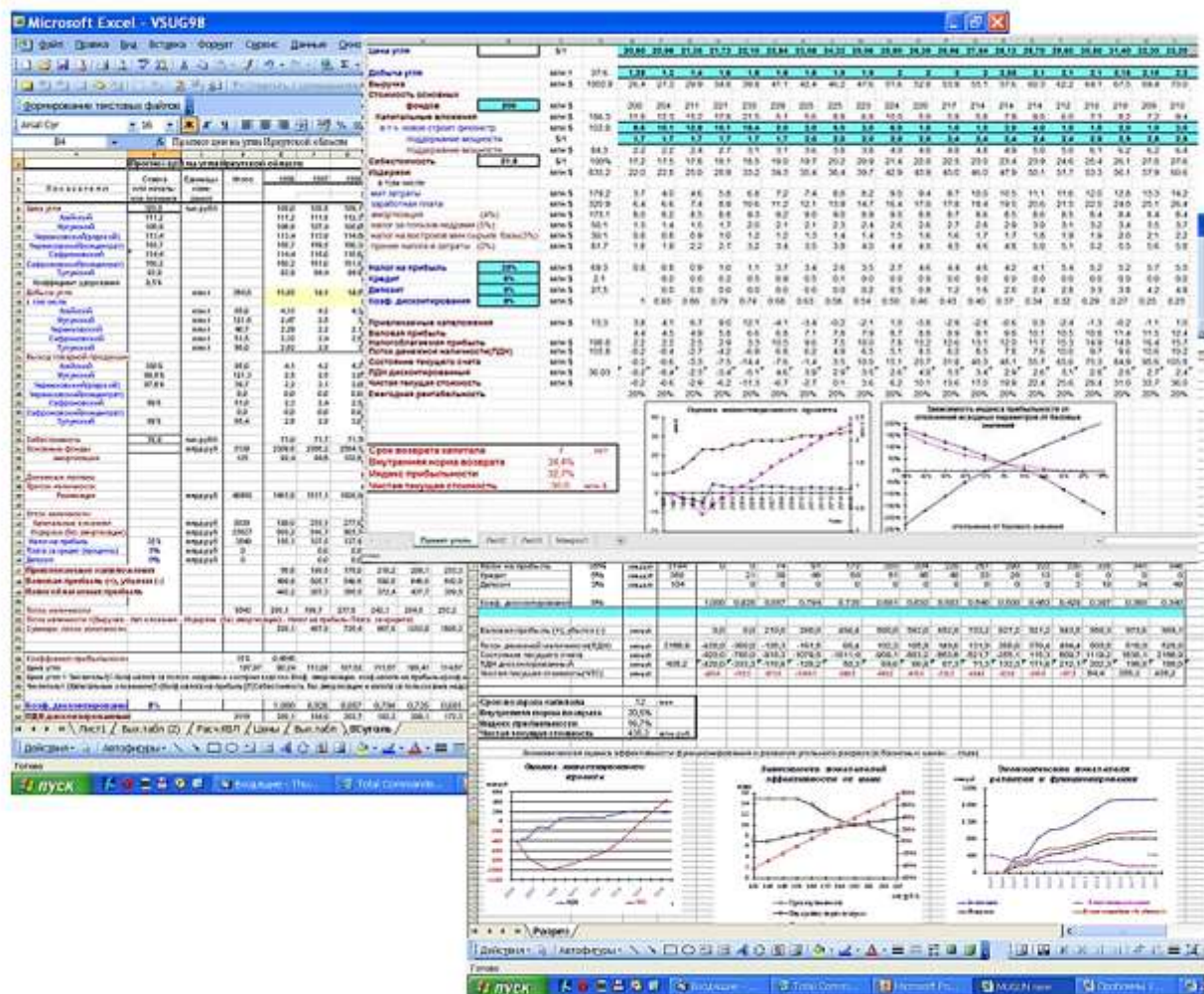


Рис. 2. Фрагменты моделей «INVEST COAL»
Fig. 2. Fragments of INVEST COAL models



Имитационные модели «Балансы», «Балансы регионов» разрабатывались для прогнозирования развития угольной промышленности при отличающихся вариантах развития экономики и энергетики и для разных периодов времени.

Модель «Балансы» использовалась при исследовании развития угольной промышленности страны.

Модель «Балансы регионов» ориентирована главным образом на угольную промышленность Восточной Сибири и Дальнего Востока по субъектам Федерации и угледобывающим предприятиям.

Имитационная модель «Субъект Федерации» применялась в исследованиях развития угольной промышленности Иркутской и Амурской областей, Республики Саха (Якутия) и других субъектов Федерации [13, 14]. Реализация модели состоит из разделов: «Инструкция по работе с моделью», «Экономико-математическая формулировка модели», «Исходные данные», «Результаты расчетов», «Таблицы для помещения в печатные материалы» (рис. 3).

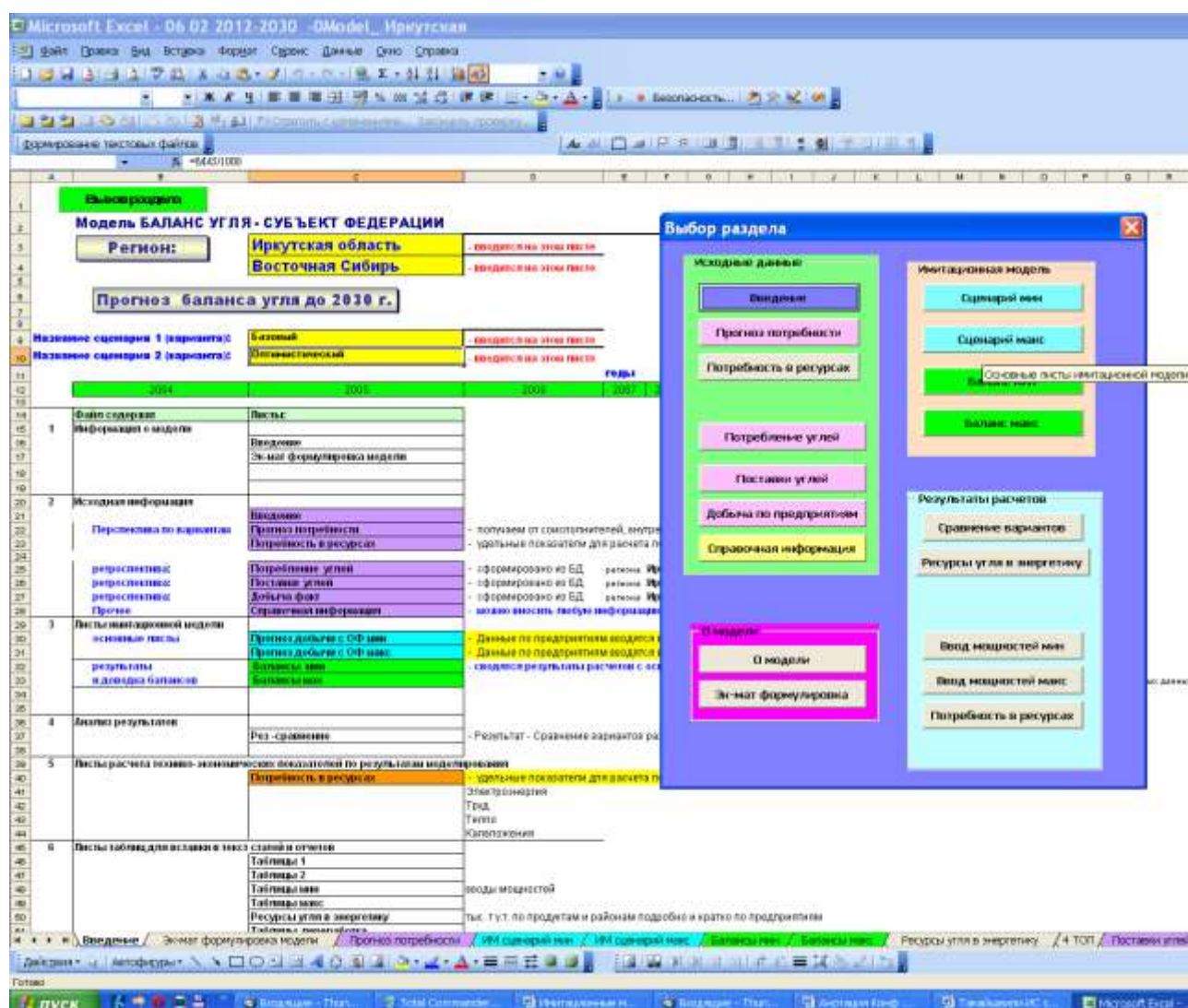


Рис. 3. Интерфейс модели «Субъект Федерации»
Fig. 3. Interface of the model Constituent Entity of the Federation

В имитационной модели, разработанной для исследования угольной промышленности республики Саха (Якутия), наиболее полно представлены все возможные аспекты функционирования угольной промышленности: добыча открытым и подземным способами энергетиче-



ского (каменного и бурого) и коксующегося углей; переработка на обогатительных фабриках; отличающиеся условия добычи, потребления и поставок углей для разных территорий республики и т.д.

В имитационных моделях «Балансы», «Балансы регионов» и «Субъект Федерации» используются показатели, основными из которых являются:

- прогнозы по вариантам развития экономики: потребность в угле; ограничения на ресурсы энергетических углей; ограничения на добычу энергетических и коксующихся углей;
- оценки по возможностям развития угледобывающих предприятий регионов;
- качественные характеристики углей;
- технико-экономические показатели деятельности предприятий;
- данные для расчета потребности в ресурсах, таких как капитальные вложения, электро- и теплоэнергия, трудовые ресурсы, соответствующие удельные показатели;
- существующая транспортная схема поставок;
- ретроспективные данные по поставкам и потреблению углей.

Результаты расчетов содержат согласованные с ретроспективными данными прогнозные показатели, оформленные в виде таблиц (с разной степенью детализации для разных моделей) в разрезах административного деления страны и регионов:

- потенциальные возможности развития добычи угля и возможные объемы производства угля экспортного качества;
- объемы направления поставок угля, в том числе на экспорт;
- объемы востребованной добычи угля, в том числе по предприятиям;
- ресурсы угля в энергетику;
- вводы мощностей в угольной промышленности;
- объемы переработки угля;
- выход товарной продукции углей;
- балансы угля всего и энергетического угля в частности;
- потребность в ресурсах: капитальные вложения в развитие угольной промышленности; численность занятых на добычу и переработку угля; в электро- и тепло-энергии на добычу и переработку угля;
- направления развития угольной промышленности (новое строительство, расширение мощностей);
- структура добычи (открытый и подземный способы, бурый и каменный угли, энергетический и коксующийся угли) и переработки;
- таблицы и графики для помещения в печатную продукцию.

С помощью представленных моделей в разные годы выполнены прогнозы развития угольной промышленности регионов и оценка инвестиционных проектов [13–15]. Сравнение результатов исследований, выполненных в предыдущие годы (2004–2014) с фактическими показателями развития угольной промышленности в последующие годы показали оправданность применения моделей такого типа для исследования перспектив развития угольной промышленности регионов. Данные прогноза на 2010 г. достаточно близки к фактическим данным, несмотря на то, что прогноз на 2010 г. и далее выполнялся без учета экономического кризиса.

Заключение

Имитационное моделирование является эффективным инструментом исследования перспектив развития угольной промышленности восточных регионов. Представленные в статье модели являются достаточно гибким, настраиваемым на конкретные задачи и адекватным инструментом исследования развития угольной промышленности. Выбранный способ реализации является рациональным, что показали многочисленные исследования. В дальнейшем



возможна интеграция моделей с учетом современного уровня развития информационных технологий и потребностей исследователя с оптимальным сочетанием адаптируемости, универсальности и минимального времени разработки.

Работа выполнена в рамках научного проекта XI.174.2. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310435-0.

Библиографический список

1. В.П. Булатов, Н.И. Воропай, А.З. Гамм [и др.]. Системные исследования в энергетике в новых социально-экономических условиях Новосибирск: Наука, 1995. 189 с.
2. Гамм А.З., Макаров А.А., Санеев Б.Г. [и др.]. Теоретические основы системных исследований в энергетике: монография. Новосибирск: Наука, 1986. 336 с.
3. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. М.: Наука, 1983. 455 с.
4. Такайшвили Л.Н. Учет свойств угольной промышленности, как системы топливно-энергетического комплекса при моделировании ее развития // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 10. С. 138–149. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-138-149>
5. Assumptions to the Annual Energy Outlook 2015 // U.S. Energy Information Administration. September 2015. 224 p. URL: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/0554\(2015\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/0554(2015).pdf) (19.06.2018).
6. Mohr S., Höök M., Mudd G., Evans G. Projection of long-term paths for Australian coal production – comparisons of four models // International Journal of Coal Geology. 2011. Vol. 86. Part 4. P. 329–341. DOI: 10.1016/j.coal.2011.03.006
7. Suwala W. Modelling Adaptation of the Coal Industry to Sustainability Conditions // Energy. 2008. Vol. 33. Issue 7. P. 1015–1026.
8. Budeba M.D., Joubert J.W., Webber-Youngman R.C.W. A proposed approach for modelling competitiveness of new surface coal mines // Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM). 2015. Vol. 115. No. 11. P. 1057–1064.
9. Цветков Н.И. Использование метода математического моделирования при комплексном проектировании угольного бассейна // Уголь. 1967. № 2. С. 10–15.
10. Плакиткина Л.С. Имитационные модели для прогнозирования угольной промышленности. // Известия РАН. Энергетика. 2010. № 3. С. 162–175.
11. Амосенок Э.П., Бабенко Т.И., Лугачева Л.И., Маркова В.М., Соколов А.В., Чурашев В.Н. [и др.]. Системное моделирование и анализ мезо- и микроэкономических объектов: монография / отв. ред. В.В. Кулешов, Н.И. Сулов. Новосибирск: Изд-во ИЭОПП СО РАН, 2014. 488 с.
12. Беляев Л.С., Воропай Н.И., Кононов Ю.П., Агафонов Г.В., Макаров А.А., Санеев Б.Г., Соколов А.Д. [и др.]. Методы исследования и управления системами энергетики: монография / отв. ред. А. П. Меренков, Ю. Н. Руденко. Новосибирск: Наука, 1987. 369 с.
13. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н., Муzychuk С.Ю. Уголь в топливно-энергетическом балансе Иркутской области // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 12. С. 185–194. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-12-185-194>
14. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н., Петров Н.А., Павлов Н.В. Угольная промышленность Республики Саха (Якутия): существующее состояние и возможности развития // Вестник ИрГТУ. 2010. № 4 (44). С. 64–69.
15. Соколов А.Д., Такайшвили Л.Н. Угольная промышленность Байкальского региона: существующее состояние и перспективы развития // Вестник ИрГТУ. 2012. № 12 (71). С. 112–118.

References

1. Bulatov V.P., Voropai N.I., Gamm A.Z. [et al.]. Sistemnye issledovaniya v energetike v novykh sotsial'no-ekonomicheskikh usloviyakh [System studies in the energy sector in the new socio-economic conditions]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1995, 189 p. (In Russian)
2. Gamm A.Z., Makarov A.A., Saneev B.G. [et al.]. *Teoreticheskie osnovy sistemnykh is-sledovaniy v energetike* [Theoretical foundations of system researches in power engineering]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1986, 336 p. (In Russian)
3. Melent'ev L.A. *Sistemnye issledovaniya v energetike* [System researches in power engineering]. Moscow: Nauka Publ., 1983, 455 p. (In Russian)
4. Takaishvili L.N. Consideration of system features of coal industry as a part of fuel and energy sector when its development modeling. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 10, pp. 138–149. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-10-138-149> (In Russian)
5. Assumptions to the Annual Energy Outlook 2015 // U.S. Energy Information Administration. September 2015. 224 p. Available at: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/0554\(2015\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/assumptions/pdf/0554(2015).pdf) (accessed 19 June 2018).
6. Mohr S., Höök M., Mudd G., Evans G. Projection of long-term paths for Australian coal production – comparisons of four models // International Journal of Coal Geology. 2011. Vol. 86. Part 4. P. 329–341. DOI: 10.1016/j.coal.2011.03.006



7. Suwala W. Modelling Adaptation of the Coal Industry to Sustainability Conditions // *Energy*. 2008. Vol. 33. Issue 7. P. 1015–1026.
8. Budeba M.D., Joubert J.W., Webber-Youngman R.C.W. A proposed approach for modelling competitiveness of new surface coal mines // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy (SAIMM)*. 2015. Vol. 115. No. 11. P. 1057–1064.
9. Tsvetkov N.I. Using mathematical modeling in coal basin integrated design. *Ugol' [Coal]*. 1967, no. 2, pp. 10–15. (In Russian)
10. Plakitkina L.S. The imitating models for forecasting of the Russian coal industry development. *Izvestiya RAN. Energetika [Izvestia RAS. Power Engineering]*. 2010, no. 3, pp. 162–175. (In Russian)
11. Amosenok E.P., Babenko T.I., Lugacheva L.I., Markova V.M., Sokolov A.V., Churashev V.N. [et al.]. *Sistemnoe modelirovanie i analiz mezo- i mikroekonomicheskikh ob"ektov* [System modeling and analysis of mezo- and microeconomic objects]. Novosibirsk: IEOPP SO RAN Publ., 2014, 488 p. (In Russian)
12. Belyaev L.S., Voropai N.I., Kononov Yu.P., Agafonov G.V., Makarov A.A., Saneev B.G., Sokolov A.D. [et al.]. *Metody issledovaniya i upravleniya sistemami energetiki* [Methods of energy system research and management]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1987, 369 p. (In Russian).
13. Sokolov A.D., Takaishvili L.N., Muzychuk S.Yu. Coal in the fuel and energy balance of the Irkutsk region. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 12, pp. 185–194. <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2017-12-185-194> (In Russian)
14. Sokolov A.D., Takaishvili L.N., Petrov N.A., Pavlov N.V. Coal industry of the Republic of Sakha (Yakutia): current condition and development possibilities. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2010, no. 4 (44), pp 64–69. (In Russian)
15. Sokolov A.D., Takaishvili L.N. Baikal region coal industry: current state and development prospects. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2012, no. 12 (71), pp. 112–118. (In Russian)

Критерии авторства

Такайшвили Л.Н. самостоятельно получены и оформлены научные результаты, она также несет ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Takaishvili L.N. has independently obtained and formalized the scientific results. She bears the responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 004.942

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-133-140>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА НА ДАВЛЕНИЕ УХОДЯЩИХ ГАЗОВ В ДЫМОВОЙ ТРУБЕ ГАЗОВОЗДУШНОГО ТРАКТА КОТЕЛЬНОГО АГРЕГАТА КАК ОБЪЕКТА С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

© В.Г. Хапусов¹, А.А. Ермаков², А.А. Подкорытов³

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

РЕЗЮМЕ. В качестве объекта исследования выбран котельный агрегат, представляющий собой сложную и взаимосвязанную систему, которая была описана как динамический стохастический объект с неконтролируемыми возмущающими воздействиями. **ЦЕЛЬ** данной работы – усовершенствование методов управления воздушным трактом котельного агрегата, а также разработка модели, позволяющей учесть динамику объекта, поскольку динамические модели по сравнению с классическими системами автоматического управления дают возможность точнее прогнозировать и управлять процессом. **МЕТОДЫ.** Математическая модель получена экспериментально-статистическими методами с применением известной методики Д.Ж. Бокса и Г. Дженкинса для идентификации процесса производства пара. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Определена степень влияния оборотов питателей сырого угля (расхода топлива) на давление уходящих газов в дымовой трубе газовоздушного тракта котельного агрегата. В результате проведенных исследований получены модели, позволяющие оценить влияние оборотов питателей сырого угля на давление уходящих газов в дымовой трубе в точках 122 и 24 м. **ВЫВОДЫ.** Разработанная модель может быть использована для прогноза и управления давлением уходящих газов в дымовой трубе газовоздушного тракта котельного агрегата.

Ключевые слова: давление газов в дымовой трубе, обороты питателей сырого угля, стохастическая модель, идентификация, оценивание, диагностическая проверка.

Информация о статье. Дата поступления 05 июля 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Хапусов В.Г., Ермаков А.А., Подкорытов А.А. Исследование влияния расхода топлива на давление уходящих газов в дымовой трубе газовоздушного тракта котельного агрегата как объекта с распределенными параметрами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 133–140. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-133-140

STUDY OF FUEL CONSUMPTION EFFECT ON FLUE GAS PRESSURE IN THE STACK OF THE AIR AND GAS PATH OF A BOILER UNIT AS AN OBJECT WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

V.G. Khapusov, A.A. Ermakov, A.A. Podkorytov

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

ABSTRACT. The study deals with the improvement of control methods of the air and gas path of a boiler unit. The **PURPOSE** of the work is to develop the models that allow for object dynamics. Dynamic models enable more accurate prediction and control of the process as compared with classical automatic control systems. **METHODS.** The article dis-

¹Хапусов Владимир Георгиевич, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизации производственных процессов, e-mail: hapusov@yandex.ru
Vladimir G. Khapusov, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Production Process Automation, e-mail: hapusov@yandex.ru

²Ермаков Андрей Андреевич, аспирант, e-mail: ermakov.istu@gmail.com
Andrey A. Ermakov, Postgraduate student, e-mail: ermakov.istu@gmail.com

³Подкорытов Алексей Александрович, аспирант, e-mail: podkorytovleha@mail.ru
Aleksey A. Podkorytov, Postgraduate student, e-mail: podkorytovleha@mail.ru



cusses the application of the well-known methods of Box D.J. and Jenkins G. for steam production process identification. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The object of the study is a boiler unit, which is a very complex and interconnected system. It is described as a dynamic stochastic object with uncontrolled disturbing influences. Using experimental and statistical methods, a mathematical model has been obtained. It allows to determine the influence degree of the raw coal feeder rotation (fuel consumption) on the flue gas pressure in the stack of the boiler unit air and gas path. **CONCLUSIONS.** The conducted studies resulted in obtaining the models that allow to evaluate the effects of raw coal feeder rotations on the flue gas pressure in the stack at the points of 122 m and 24 m. The developed model can be used for prediction and control the pressure of flue gases in the stack of the air and gas path of the boiler unit.

Keywords: gas pressure in the stack, rotations of raw coal feeders, stochastic model, identification, evaluation, diagnostic test

Information about the article. Received July 5, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Khapusov V.G., Ermakov A.A., Podkorytov A.A. Study of fuel consumption effect on flue gas pressure in the stack of the air and gas path of a boiler unit as an object with distributed parameters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 133–140. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-133-140 (In Russian)

Введение

В качестве объекта исследования был выбран котельный агрегат БКЗ-420-140-6, оборудованный четырьмя установками по приготовлению пыли [1]. Данный котлоагрегат работает в блоке из четырех котлов (БКЗ-420), дымовые газы которых отводятся в дымовую трубу высотой 180 м и диаметром устья 6 м. воздушный тракт котельного агрегата как объект управления представляет собой весьма сложную и взаимосвязанную систему. Ее можно охарактеризовать как динамический стохастический объект с не измеряемыми возмущающими воздействиями [2]. Обороты вращения питателей сырого угля являются возмущающим фактором газовоздушного тракта котельного агрегата. Косвенным параметром, характеризующим работу газовоздушного тракта, может служить давление уходящих газов в дымовой трубе⁴ [3].

Цель данного исследования – получить математические модели, позволяющие оптимизировать топочные процессы (приблизиться к параметрам оптимального

управления). Управление расходом дымовых газов позволит уменьшить загрязнения, возникающие при любых процессах горения, поддержать необходимые эксплуатационные параметры в дымовой трубе, сократить тепловые потери с уходящими газами. Для достижения поставленных целей необходимо построить математические модели влияния оборотов вращения питателей сырого угля на давление уходящих газов в дымовой трубе⁵ [4].

Данные, собранные в течение длительного времени наблюдений за нормальным ходом процесса выработки пара, были подвергнуты статистическому анализу.

В период пассивного эксперимента контролировались следующие технологические факторы:

dP_{24} – давление дымовых газов в точке 24 м по высоте трубы;

dP_{122} – давление дымовых газов в точке 122 м по высоте трубы;

f – обороты вращения питателей сырого угля ПСУ-А,Б,В,Г.

Сбор статистических данных длился

⁴Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для вузов; 2-е изд. перераб. и доп. М.: ИД МЭИ, 2004. 400 с. / Rotach V.Ya. Theory of automatic control: textbook for higher schools. Moscow: MEI Publishing House., 2005, 400 p.

⁵Волошенко А.В. Принципиальные схемы паровых котлов и топливоподач: учеб. пособие. Томск: Изд-во НИТПУ, 2011. 100 с. / Voloshenko A.V. Basic schemes of steam boilers and fuel supply: Learning aid. Tomsk: Publishing house of NRTPU, 2011, 100 p.



в течение смены с интервалом отсчета 10 с.

Для исследования влияния оборотов вращения питателей сырого угля на давление уходящих газов в дымовой трубе были использованы методы корреляционного и регрессионного анализа. Исходной информацией для этого послужили временные ряды: давление уходящих газов в дымовой трубе в точке 24 м – Y_1 ; давление уходящих газов в дымовой трубе в точке 122 м – Y_2 ; обороты вращения питателей сырого угля – X_1 ⁶ [5, 6].

С целью приведения указанных выше временных рядов к стационарному виду согласно методике, представленной в работе [1], для каждого ряда были получены разностные временные ряды с помощью

оператора взятия разностей $\tilde{N}^d$ [7]:

$$x_t = \tilde{N}^d \cdot X_t; y_t = \tilde{N}^d \cdot Y_t; d > 0,$$

где d – порядок разности; x_t, y_t – нормированные значения временных рядов:

$$x_t = (X_t - \bar{X}_t) / \sigma_x; y_t = (Y_t - \bar{Y}_t) / \sigma_y,$$

$\bar{X}_t, \bar{Y}_t$ – средние значения ряда, σ_x, σ_y – среднеквадратичное отклонение.

В качестве примера на рис. 1 приведены временные ряды оборотов питателей сырого угля и давления уходящих газов в дымовой трубе в стандартизированном виде [8].

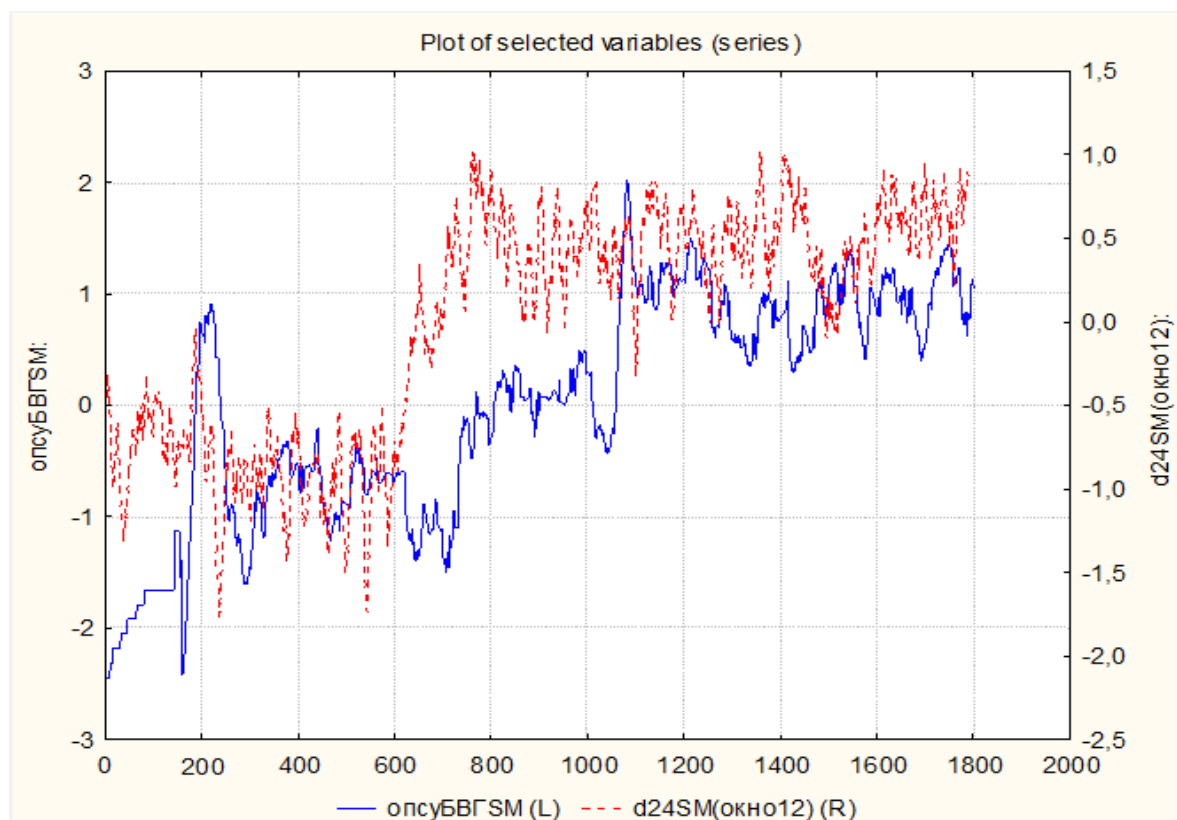


Рис. 1. Временные ряды оборотов питателей сырого угля и давления уходящих газов в дымовой трубе в точке 24 м в стандартизированном виде

Fig. 1. Time series of raw coal feeder rotations and flue gas pressure in the stack at the point of 24m in a standardized form

⁶Хапусов В. Г. Моделирование систем: учеб. пособие. Иркутск: Изд-во ИрННТУ, 2007. 212 с. / Khapusov V.G. Modeling of systems: Learning aids. Irkutsk: INRTU Publ., 2007, 212 p.



С целью приведения указанных выше временных рядов к стационарному виду по методике, представленной в работе [1], для каждого ряда были получены разностные временные ряды с помощью оператора взятия разностей ∇^d :

$$x_t = \nabla^d X_t; y_t = \nabla^d Y_t; d > 0.$$

Оказалось, что уже при $d = 1$ исследуемые разностные временные ряды имеют быстро затухающую автокорреляционную функцию.

Приведение рядов к стационарному виду позволяет использовать метод взаимных корреляционных функций для определения в структуре модели таких временных интервалов, для которых коэффициент связи между оборотами питателей сырого угля и давлением уходящих газов в дымовой трубе имеет существенный уровень значимости [9].

В качестве примера на рис. 2 приведен график взаимно-корреляционной функ-

ции $R_{xy(k)}$ между наблюдаемыми рядами $Y_{1,t}$ $X_{1,t}$ (обороты питателей сырого угля) и рядом $X_{1,t}$ (давления уходящих газов в дымовой трубе), полученными в результате обработки статистического материала.

Визуальный анализ этого графика не позволяет сделать однозначного вывода о тех временных интервалах, при которых обороты питателей сырого угля существенно влияют на давление уходящих газов в дымовой трубе, так как механизм взаимодействия завуалирован коррелированностью значений входного ряда, но помогает определить значимость коэффициентов взаимной корреляции.

Для устранения эффекта коррелированности предлагается к входному и выходному рядам применить дополнительную процедуру выравнивания («выбеливания») на основе построения для этих рядов моделей авторегрессии и скользящего среднего /APCC/:

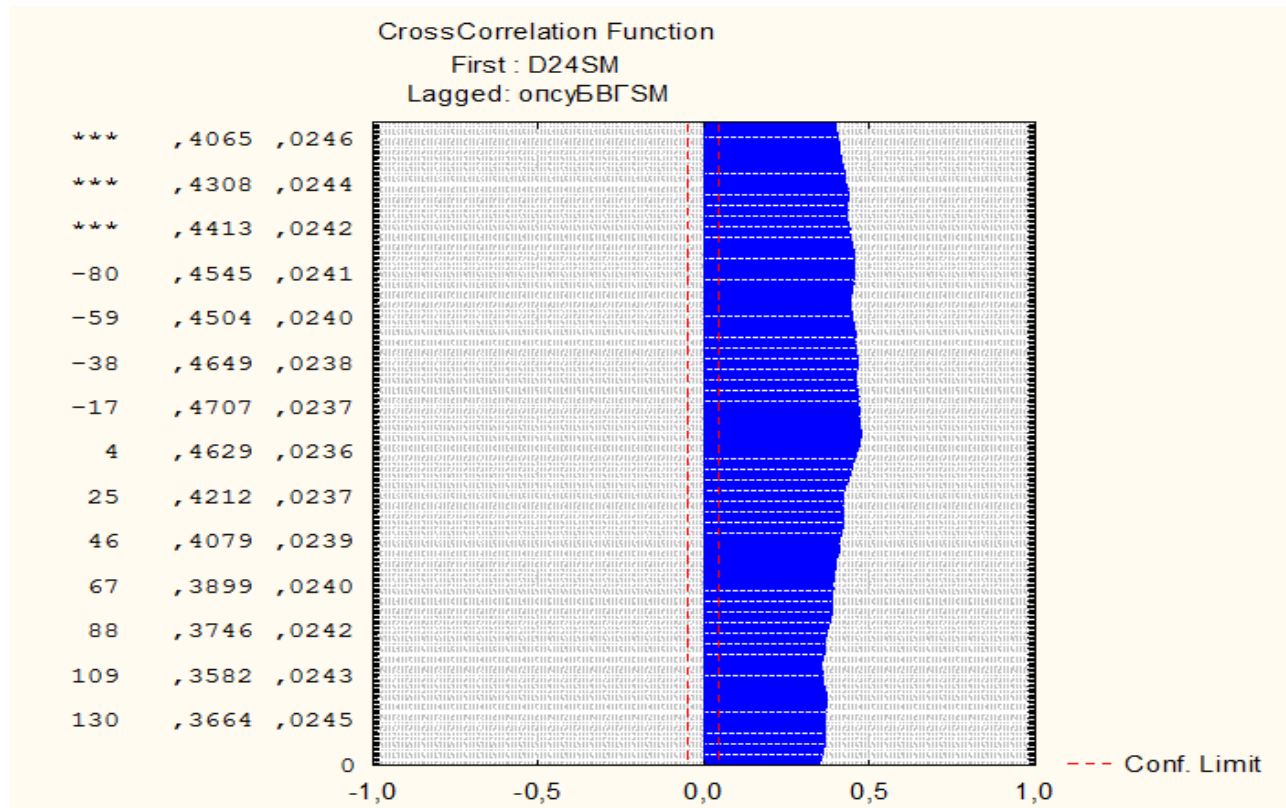


Рис. 2. Выборочная взаимная корреляционная функция $R_{xy(k)}$ по наблюдаемым данным
Fig. 2. Selective mutual correlation function $R_{xy(k)}$ by the observed data



$$\alpha_t = x_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i x_{t-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_{t-j} \alpha_{t-j};$$

$$\beta_t = y_t - \sum_{i=1}^p \Phi_i y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \Theta_{t-j} \beta_{t-j},$$

где α_t , β_t – выравненные ряды соответственно для входных и выходных разностных рядов; Φ_i – значения параметров для авторегрессионной модели; Θ_{t-j} – значения параметров для модели скользящего среднего; p – порядок модели авторегрессии; q – порядок модели скользящего среднего.

Для получения оценок p , q , Φ_i был применен нелинейный алгоритм наименьших квадратов [10].

В табл. 1 приведены выборочные взаимные корреляционные функции $r_{\alpha\beta}(k)$ после предварительного выравнивания спектра; там же даны приближенные стандартные ошибки выборочной взаимной корреляции $\sigma(r)$.

Сравнение коэффициентов взаимной корреляции с их стандартными ошибками $\sigma(r)$ показывает, что давление уходящих газов в дымовой трубе в точке $dP24$ тесно связано со значениями оборотов питателей сырого угля в диапазоне 30–130 с.

Давление уходящих газов в дымовой трубе в точке 122 метра по высоте трубы тесно связано со значениями оборотов питателей сырого угля в диапазоне

от 30 до 130 с.

Привязка модели к наблюдаемым значениям временных рядов осуществляется в несколько этапов: сначала делается пробная идентификация на основе анализа приближенной функции отклика на единичный импульс, затем применяется процедура нелинейного оценивания пробной модели и диагностическая проверка с использованием критерия согласия χ^2 [11].

Динамические стохастические модели влияния оборотов питателей сырого угля на давление уходящих газов в дымовой трубе в точках $dP122$ и $dP24$ были получены с использованием методики Бокса – Дженкинса в классе моделей

$$y_t = \delta^{-1}(B)_{\omega} (B)_{\omega} \cdot x_{t-b} + n_t,$$

где B – оператор сдвига назад на один шаг; b – параметр запаздывания:

$$\delta(B) = 1 - \delta_1 B - \delta_2 B^2 - \dots - \delta_r B^r;$$

$$\omega(B) = \omega_0 - \omega_1 B - \omega_2 B^2 - \dots - \omega_s B^s.$$

С целью получения более точной модели в уравнениях была учтена шумовая составляющая n_t , которая описывалась в классе моделей АРПСС:

$$n_t = y_t - y_t^*,$$

Таблица 1
Выборочная взаимная корреляционная функция после выравнивания спектра

Table 1

Selective mutual correlation function after spectrum equalization

Вход	Выход	Сдвиг k	Коэффициент взаимной корреляции $r_{\alpha\beta}(K)$						Ошибка $\sigma(r)$
$f(t)$	$dP24$	16–21	0,0546	0,0346	-0,054	0,0349	0,0221	0,0332	0,024
		25–30	0,0214	0,0115	-0,050	0,0067	-0,016	0,0254	
		38–43	0,0226	0,0009	0,063	0,047	0,052	0,022	
		47–52	-0,049	0,0106	0,0077	0,0608	0,049	-0,021	
		53–58	-0,11	-0,04	0,049	-0,003	0,0019	0,0608	
		106–111	0,0015	-0,021	-0,050	0,003	0,0064	0,0090	
	$dP122$	13–18	-0,014	0,024	-0,052	-0,013	-0,027	-0,042	0,024
		33–38	-0,027	0,009	-0,049	0,014	-0,048	-0,018	
		41–46	0,0023	-0,0548	0,037	0,0032	-0,053	0,0083	
		120–125	0,037	0,015	-0,034	0,049	-0,015	0,016	



где y_t – наблюдаемый временной ряд;
 y_t^* – значения ряда, получаемые по модели

$$n_t = \Phi^{-1}(B) \cdot \Theta(B)\alpha_s,$$

где α_s – остаточная ошибка.

Динамические стохастические модели влияния оборотов вращения питателей сырого угля ПСУ-Б,В,Г на давление уходящих газов в дымовой трубе, полученные соответственно в точках $dP122$ и $dP24$, имеют вид:

- для точки 122 м:

$$\begin{aligned} & (1 + 0,768 B + 0,589 B^2 + 0,495 B^3 + \\ & \pm 0,023 \quad \pm 0,029 \quad \pm 0,033 \\ & + 0,405 B^4 + 0,319 B^5 + 0,249 B^6 + 0,22 B^7 + \\ & \pm 0,033 \quad \pm 0,034 \quad \pm 0,033 \quad \pm 0,032 \\ & + 0,177 B^8 + 0,72 B^9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \nabla P_{122}(t) = -0,352 \nabla f(t-5) - \\ & \pm 0,156 \\ & - 0,350 \nabla f(t-35) - 0,286 B \nabla f(t-37) - \\ & \pm 0,156 \quad \pm 0,156 \\ & - 0,331 B^2 \nabla f(t-42) - 0,303 \nabla f(t-45) + \\ & \pm 0,156 \quad \pm 0,0156 \\ & + 0,369 \nabla f(t-123) + n_t. \\ & \pm 0,156 \end{aligned}$$

Значение шума описывается моделью

$$\begin{aligned} & (1 - 1,51 B + 0,56 B^2) n_t = \\ & \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \\ & = (1 - 1,54 B + 0,56 B^2) \alpha_t, \\ & \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \end{aligned}$$

где ∇ – первые разности; значения под коэффициентами – стандартные ошибки;

- для точки 24 м:

$$\begin{aligned} & (1 + 0,768 B + 0,589 B^2 + 0,495 B^3 + \\ & \pm 0,023 \quad \pm 0,029 \quad \pm 0,033 \\ & + 0,405 B^4 + 0,319 B^5 + 0,249 B^6 + 0,22 B^7 + \\ & \pm 0,033 \quad \pm 0,034 \quad \pm 0,033 \quad \pm 0,032 \\ & + 0,177 B^8 + 0,72 B^9) \nabla P_{122}(t) = \\ & \pm 0,029 \quad \pm 0,03 \\ & = -0,599 \nabla f(t-18) - 0,543 \nabla f(t-27) + \\ & \pm 0,256 \quad \pm 0,256 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & + 0,716 \nabla f(t-40) - 0,595 \nabla f(t-47) + \\ & \pm 0,256 \quad \pm 0,256 \\ & + 0,586 \nabla f(t-51) + 0,556 B \nabla f(t-55) - \\ & \pm 0,256 \quad \pm 0,256 \\ & - 0,581 \nabla f(t-109) + n_t. \\ & \pm 0,256 \end{aligned}$$

Значение шума описывается моделью

$$\begin{aligned} & (1 - 1,63 B + 0,69 B^2) n_t = \\ & \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \\ & = (1 - 1,68 B + 0,7 B^2) \alpha_t. \\ & \pm 0,024 \quad \pm 0,024 \end{aligned}$$

Полученные модели анализируются на адекватность реальному процессу влияния оборотов питателей сырого угля на давление уходящих газов в дымовой трубе в точках $dP122$ и $dP24$ с помощью диагностической проверки [3], осуществляемой в два этапа:

1) вычисление χ^2 -статистики для значений автокорреляционной функции остаточных ошибок $raa(k)$, таких как $Q = (N-s-b-r) \sum_{k=1}^k raa^2(k)$,

где N – число наблюдений; k – максимальная задержка автокорреляций и взаимных корреляций; s – число «правосторонних» параметров динамической стохастической модели; r – число «левосторонних» параметров;

2) вычисление χ^2 -статистики с использованием взаимных корреляционных функций $r(k)$ между выравненным входным рядом α_t и рядом остаточных ошибок α_{t-1} , таких как $H = (N-s-b-r) \sum_{k=1}^k r(k)$ [12].

В первом случае Q сравнивается с χ^2 -распределением с $k-p-q$ степенями свободы, а во втором H сравнивается с χ^2 -распределением с $k-r-s$ степенями свободы [13].

В табл. 2 приведены значения коэффициентов χ^2 -статистики диагностической проверки по автокорреляционной и взаимной корреляционной функциям для всех частот вращения питателей сырого угля.



Таблица 2

Значение коэффициентов
 χ^2 -статистика

Table 2

Value of χ^2 -statistics coefficients

Вход	Выход	Число степеней свободы	N	Число степеней свободы	Q
$f(t)$	dP24	27	3,65	27	3,65
$f(t)d$	dP122	27	1,67	27	5,11

Диагностическая проверка по автокорреляционным и взаимно-корреляционным функциям с использованием значений χ^2 -статистики не дает оснований сомневаться в адекватности модели.

В результате проведенных исследований получены модели, позволяющие оценить влияния оборотов питателей сырого угля на давление уходящих газов в дымовой трубе в точках 122 и 24 м.

Модели могут быть использованы для прогноза и управления давлением уходящих газов в дымовой трубе в зависимости от оборотов питателей сырого угля. При увеличении оборотов питателей сырого угля давление уходящих газов в дымовой трубе в точках dP122 и dP24 возрастает и в конечном счете оказывает влияние на тягу и температуру в топке.

Библиографический список

1. Оскорбин Н.С., Беднаржевский В.С. Разработка пакетов и комплексов программ в теплоэнергетике // Известия Алтайского государственного университета. 2004. № 1 (31). С. 58–62.
2. Плетнев Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств в теплоэнергетике. 4-е изд. М.: ИД МЭИ, 2007. 352 с.
3. Аракелян Э.К., Пикина Г.А. Оптимизация и оптимальное управление. 2-е изд. М.: ИД МЭИ, 2007. 408 с.
4. Серов Е.П., Корольков Б.П. Динамика парогенераторов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1981. 406 с.
5. Хапусов В.Г., Баев А.В. Смешанные авторегрессионные модели и прогнозирование процесса выработки пара // Вестник ИрГТУ. 2014. № 12 (95). С. 29–34.
6. Хапусов В.Г., Ермаков А.А. Динамические стохастические модели управления котлоагрегатом по каналу «обороты питателей сырого угля – расход пара» // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 8. С. 65–73. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-8-65-72
7. Шорохов В.А., Смольников А.П. Разработка динамической модели многосвязной АСР пылеугольного блока с прямым дуванием пыли // Теплоэнергетика. 2009. № 10. С. 56–61.

8. Хапусов В.Г., Ермаков А.А. Динамические стохастические модели по каналу «частота вращения питателей сырого угля – содержание кислорода в уходящих газах» в производстве пара // Вестник ИрГТУ. 2016. № 2 (109). С. 45–50.
9. Хапусов В.Г., Ершов П.Р., Ермаков А.А. Прогнозирование качественных показателей топочной камеры с учетом упреждающего индикатора по расходу топлива в процессе произв. пара // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 7. С. 87–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-7-87-94
10. Семененко М.Г. Введение в математическое моделирование. М.: Солон-Р, 2002. 130 с.
11. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. Time Series Analysis: Forecasting and Control. Prentice Hall, 1994. 614 p.
12. Couto N., Silva V., Monteiro E., Teixeira S., Chacartegui R., Bouziane K., Brito P.S.D., Rouboa A. Numerical and Experimental Analysis of Municipal Solid Wastes Gasification Process // Applied Thermal Engineering. 2015. Vol. 78. P. 185–195. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.036.
13. Vojtesek J., Spacek L. MATLAB as a tool for modeling and Simulation of the nonlinear system // Advances in intelligent systems and computing. 2018. Vol. 765. P. 133–143.

References

1. Oskorbin N.S., Bednarzhevskii V.S. Development of packages and software packages in heat power engineering. *Izvestiya Altaiskogo gosudarstvennogo universiteta* [Izvestia of Altai State University]. 2004,

- no. 1 (31), pp. 58–62. (In Russian)
2. Pletnev G.P. *Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv v teploenergetike* [Automation of technological processes and productions in heat and



power engineering]. Moscow: MEI Publishing House, 2007, 352 p. (In Russian)

3. Arakelyan E.K., Pikina G.A. *Optimizatsiya i optimal'noe upravlenie* [Optimization and optimal control] Moscow: MEI Publishing House, 2007, 408 p. (In Russian)

4. Serov E.P., Korol'kov B.P. *Dinamika parogeneratorov* [Dynamics of steam generators]. Moscow: Energoizdat Publ., 1981, 406 p. (In Russian)

5. Khapusov V.G., Baev A.V. Mixed autoregressive models and steam production forecast. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 12 (95), pp. 29–34. (In Russian)

6. Khapusov V.G., Ermakov A.A. Dynamic stochastic control models of a package boiler by the channel “coal feeder rotations – steam consumption”. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 8, pp. 65–73. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-8-65-72 (In Russian)

7. Shorokhov V.A. Smol'nikov A.P. Development of a dynamic model simulating a multiply connected automatic control system of a coal-fired power unit equipped with a direct injection dust feed system. *Teploenergetika* [Thermal Engineering]. 2009, no. 10, pp. 56–61. (In Russian)

8. Khapusov V.G. Ermakov A.A. Dynamic stochastic models by the channel “rotation speed of raw coal

feeders – oxygen content in flue gases” in steam production. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2016, no. 2 (109), pp. 45–50. (In Russian)

9. Khapusov V.G., Ershov P.R., Ermakov A.A. Forecasting furnace chamber qualitative parameters with regard to the predictive indicator on fuel consumption under steam production. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 7, pp. 87–94. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-7-87-94 (In Russian)

10. Semenenko M.G. *Vvedenie v matematicheskoe modelirovanie* [Introduction to mathematical modeling]. Moscow: Solon-R Publ., 2002, 130 c. (In Russian)

11. Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel G.C. *Time Series Analysis: Forecasting and Control*. Prentice Hall, 1994. 614 p.

12. Couto N., Silva V., Monteiro E., Teixeira S., Chacartegui R., Bouziane K., Brito P.S.D., Rouboa A. Numerical and Experimental Analysis of Municipal Solid Wastes Gasification Process // *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 78. P. 185–195. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.12.036.

13. Vojtesek J., Spacek L. MATLAB as a tool for modeling and Simulation of the nonlinear system. *Advances in intelligent systems and computing*. 2018, vol. 765, pp. 133–143.

Критерии авторства

Хапусов В.Г., Ермаков А.А., Подкорытов А.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Khapusov V.G., Ermakov A.A., Podkorytov A.A. 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.



МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЯХ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

© Н.В. Буюкова¹, В.П. Закарюкин², А.В. Крюков³

¹Ангарский государственный технический университет,
665835, Российская Федерация, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60.

^{2,3}Иркутский государственный университет путей сообщения,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15.

³Иркутский национальный исследовательский технический университет,
664074, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Разработка методов и средств моделирования электромагнитных полей при прохождении тяговой сети в искусственных сооружениях железнодорожного транспорта. **МЕТОДЫ.** Применялись методы определения режимов систем тягового электроснабжения на базе фазных координат, в основу которых положены модели элементов в виде решетчатых схем замещения, обладающих полновязной топологией. Эти модели и методы реализованы в программном комплексе Fazonord, обеспечивающем моделирование режимов систем тягового электроснабжения различного типа, а также определение напряженностей электромагнитного поля, которое создается тяговыми сетями этих систем тягового электроснабжения. При вычислении напряженностей детали искусственных сооружений моделировались наборами заземленных проводов. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Представлены результаты моделирования условий электромагнитной безопасности в тяговых сетях на участках железных дорог, проходящих в искусственных сооружениях: галереях, мостах, тоннелях. Металлические конструкции этих сооружений существенно изменяют картину распределения напряженностей электромагнитного поля в пространстве. Это связано с наличием заземленных проводящих объектов, превращающих тоннели, галереи и мосты с ездой понизу в ограниченные пространства, а также с удаленностью поверхности земли на мостах с ездой поверху. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Результаты моделирования электромагнитных полей в искусственных сооружениях железнодорожного транспорта показывают, что на высоте 1,8 м от железнодорожного полотна наибольшими электрическими и магнитными полями характеризуется мост с ездой поверху, напряженности полей которого выше, чем на открытом пространстве. Тоннель, мост с ездой понизу и галерея характеризуются меньшими напряженностями и более низкими потоками электромагнитной энергии. Это связано с близостью к контактной сети экранирующих металлических конструкций этих сооружений. Передача энергии электромагнитным полем в тоннелях, на галереях и мостах с ездой понизу происходит в ограниченном пространстве между контактной сетью и расположенными поблизости заземленными конструкциями.

Ключевые слова: искусственные сооружения железных дорог, электромагнитная безопасность.

¹Буюкова Наталья Васильевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, e-mail: bn_900@mail.ru

Natalya V. Buyakova, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, e-mail: bn_900@mail.ru

²Закарюкин Василий Пантелеймонович, доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики транспорта, e-mail: zakar49@mail.ru

Vasily P. Zakaryukin, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Transport Electrical Engineering, e-mail: zakar49@mail.ru

³Крюков Андрей Васильевич, доктор технических наук, академик Российской академии транспорта, член-корреспондент АН ВШ РФ и Российской инженерной академии, заслуженный энергетик Республики Бурятия, профессор кафедры электроснабжения и электротехники ИРНИТУ, профессор кафедры электроэнергетики транспорта ИргТУПС, e-mail: and_kryukov@mail.ru

Andrey V. Kryukov, Doctor of technical sciences, Academician of the Russian Academy of Transport, Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Higher School of the Russian Federation and Russian Engineering Academy, Honored Power Engineer of the Republic of Buryatia, Professor of the Department of Power Supply and Electrical Equipment Irkutsk National Research Technical University, Professor of the Department of Transport Electric Engineering Irkutsk State Transport University, e-mail: and_kryukov@mail.ru



Информация о статье. Дата поступления 12 июля 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Буякова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование электромагнитных полей в искусственных сооружениях железнодорожного транспорта // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 141–151. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-141-151

MODELING OF ELECTROMAGNETIC FIELDS IN RAILWAY ENGINEERING STRUCTURES

N.V. Buyakova, V.P. Zakaryukin, A.V. Kryukov

Angarsk State Technical University,
60, Chaikovsky St., Angarsk, 665835, Russian Federation
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation
Irkutsk National Research Technical University,
83, Lermontov St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the study is development of methods and tools for modeling electromagnetic fields when passing a tractive network in artificial constructions of railway transport. **METHODS.** The study employs the methods for determining the modes of traction power supply systems (TPSS) using phase coordinates, which are based on the models of elements in the form of lattice equivalent circuits with a fully-meshed topology. These models and methods are implemented in the program complex Fazonord providing simulation of the TPSS modes of different types as well as determination of strengths of an electromagnetic field created by tractive networks of these traction power supply systems. When calculating the strengths the elements of artificial constructions have been simulated by the sets of grounded wires. **RESULTS.** The article presents the simulation results of electromagnetic safety conditions in the traction networks on the sections of railroads located in artificial constructions including galleries, bridges, tunnels. The metal work of these structures significantly affects a distribution pattern of electromagnetic field strengths in space. This fact is explained by the presence of the grounded conducting objects (which transform the tunnels, galleries and bottom-road bridges into limited spaces) and remoteness of the Earth's surface when moving on the deck-type bridges. **CONCLUSION.** The simulation results of electromagnetic fields in the engineering structures of railway transport show that at the height of 1.8 m from railroad tracks the deck-type bridge has the greatest electric and magnetic fields the strengths of which are higher than in the open space. The tunnel, gallery and the bottom-road bridge are characterized by smaller strengths and lower flows of electromagnetic energy, which is due to the closeness of the screening metal works of these constructions to the catenary system. The energy is transferred by an electromagnetic field in tunnels, on galleries and bottom-road bridges in a limited space between the catenary system and grounded constructions located nearby.

Keywords: *engineering railway structures, electromagnetic safety*

Information about the article. Received July 12, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electromagnetic fields in railway engineering structures. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2018, vol. 22, no. 9, pp. 141–151. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-141-151 (In Russian)

Введение

Высоковольтные или сильнотоочные линии электропередачи создают электромагнитные поля (ЭМП), которые могут вызывать помехи, приводящие к нарушениям нормального функционирования электрических и электронных устройств, а также приводить к тяжелым несчастным случаям при воздействии на персонал, работающий на отключенных линиях электропередачи наведенных напряжений [1–4].

В условиях электрифицированной железной дороги трудно получить экспериментальные данные, объективно характеризующие условия электромагнитной безопасности. Поэтому анализ этих условий в системах электроснабжения железных дорог выполняется на основе компьютерного моделирования [5–15]. В статье представлены результаты моделирования условий электромагнитной безопасности в тяговых сетях на участках железных дорог, проходящих в искусственных сооружениях: галереях, мостах, тоннелях. Металлические конструкции



этих сооружений существенно изменяют картину распределения напряженностей электромагнитного поля в пространстве.

Методика моделирования

Рассматриваемые методы моделирования систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) базируются на использовании решетчатых схем замещения (РСЗ), имеющих полную связную топологию:

$$TEC : hub \cup con, \forall i, j \subset hub \rightarrow con_{i,j} \subset con ,$$

где TEC – обозначение РСЗ; hub – множество узлов РСЗ; con – множество ветвей РСЗ.

Основные элементы, образующие трехфазно-однофазную сеть СЭЖД, можно разделить на две группы:

- воздушные и кабельные линии электропередачи, токопроводы, тяговые сети (ТС), осуществляющие транспорт электроэнергии;
- трансформаторы различных конструкций.

Указанные устройства можно представлять в виде набора проводов или обмоток с электромагнитными связями [16] и рассматривать как статические многопроводные элементы.

На основе предлагаемого подхода реализована методика анализа электромагнитной безопасности, которую отличают следующие особенности [6, 16]:

- определение ЭМП с учетом характеристик сложной СЭЖД и питающей электроэнергетической системы;
- моделирование линий электропередачи и тяговых сетей различной конструкций;
- совмещение расчетов режима и определения напряженностей ЭМП;
- учет искусственных сооружений транспорта.

Анализ условий электромагнитной безопасности осуществляется в два этапа:

1. Расчет режима СЭЖД или совокупности режимов, отвечающей движению набора поездов на выбранном временном интервале.

2. Определение напряженностей электромагнитного поля, которое создается тяговой сетью, входящей в состав моделируемой системы.

Составляющие напряженности электрического поля, создаваемого набором N проводов, в точке с координатами (x, y) рассчитываются по следующим формулам:

$$\dot{E}_y = -\frac{1}{\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{y_i[(x-x_i)^2 - y^2 + y_i^2]}{\xi_i}; \quad \dot{E}_x = \frac{2}{\pi \varepsilon_0} \sum_{i=1}^N \dot{\tau}_i \frac{(x-x_i)yy_i}{\xi_i},$$

где $\xi_i = [(x-x_i)^2 + (y+y_i)^2][(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]$; $\dot{\tau}_i$ – заряд провода i на единицу длины, определяемый из первой группы формул Максвелла;

$$\dot{T} = A^{-1} \cdot \dot{U}.$$

Ось Y декартовой системы координат направлена вертикально вверх, ось X – перпендикулярно железной дороге, ось Z – противоположно току контактной сети.

Здесь $\dot{U} = [\dot{U}_1 \quad \dots \quad \dot{U}_N]^T$ – вектор напряжений проводов по отношению к земле;

$\dot{T} = [\dot{\tau}_1 \quad \dots \quad \dot{\tau}_N]^T$ – вектор зарядов проводов, A – матрица потенциальных коэффициентов, в которой



$$\alpha_{ii} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{2y_i}{r_i}, \quad \alpha_{ij} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2}}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}},$$

где x_i, y_i – координаты расположения провода i радиуса r_i над землей ($y = 0$ соответствует поверхности плоской земли), ϵ_0 – электрическая постоянная.

Вертикальная и горизонтальная составляющие напряженности магнитного поля вычисляются по следующим выражениям:

$$\dot{H}_x = \frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \dot{I}_i \frac{y - y_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}; \quad \dot{H}_y = -\frac{1}{2\pi} \sum_{i=1}^N \dot{I}_i \frac{x - x_i}{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2},$$

где $\dot{I}_i$ – токи, протекающие по проводам ТС, а также по проводникам, имитирующим заземленные объекты.

По результатам определения составляющих $\dot{E}_x, \dot{E}_y, \dot{H}_x, \dot{H}_y$ рассчитываются амплитудные значения напряженностей $E_{\text{MAX}}, H_{\text{MAX}}$.

Кроме того, может быть определена плотность потока активной мощности следующему по выражению:

$$\Pi_0 = E_x H_y \cos(\psi_{E_x} - \psi_{H_y}) - E_y H_x \cos(\psi_{E_y} - \psi_{H_x}),$$

где $\psi_{E_x}, \psi_{E_y}, \psi_{H_x}, \psi_{H_y}$ – фазовые углы составляющих $\dot{E}_x, \dot{E}_y, \dot{H}_x, \dot{H}_y$.

Описанные методы моделирования режимов систем электроснабжения железных дорог (СЭЖД) и реализованный на их основе программный комплекс Fazonord позволяют использовать в моделях до нескольких сотен проводов [16]. Это дает возможность моделировать проводящие конструкции искусственных сооружений наборами заземленных проводов, расположенных таким образом, чтобы промежутки между ними были значительно меньше расстояния до точки наблюдения. Ниже представлены результаты моделирования электромагнитной обстановки на этих объектах.

Результаты моделирования

Металлические конструкции искусственных сооружений железнодорожного транспорта (тоннелей, мостов, галерей) существенно изменяют картину распределения напряженностей ЭМП в пространстве [6]. Это связано с наличием заземленных проводящих объектов, превращающих тоннели, галереи и мосты с ездой понизу в ограниченные пространства, а также с отдаленностью поверхности земли на мостах с ездой поверху. Для анализа отличий ЭМП в искусственных сооружениях от ЭМП в открытом пространстве предприняты исследования для объектов, разрезы которых показаны на рис. 1–2.

Модели этих сооружений реализованы с помощью наборов тонких заземленных проводов в программном комплексе Fazonord. Координаты токоведущих частей и проводников, имитирующих металлические конструкции, показаны на рис. 3. Схемы расчетных моделей представлены на рис. 4.

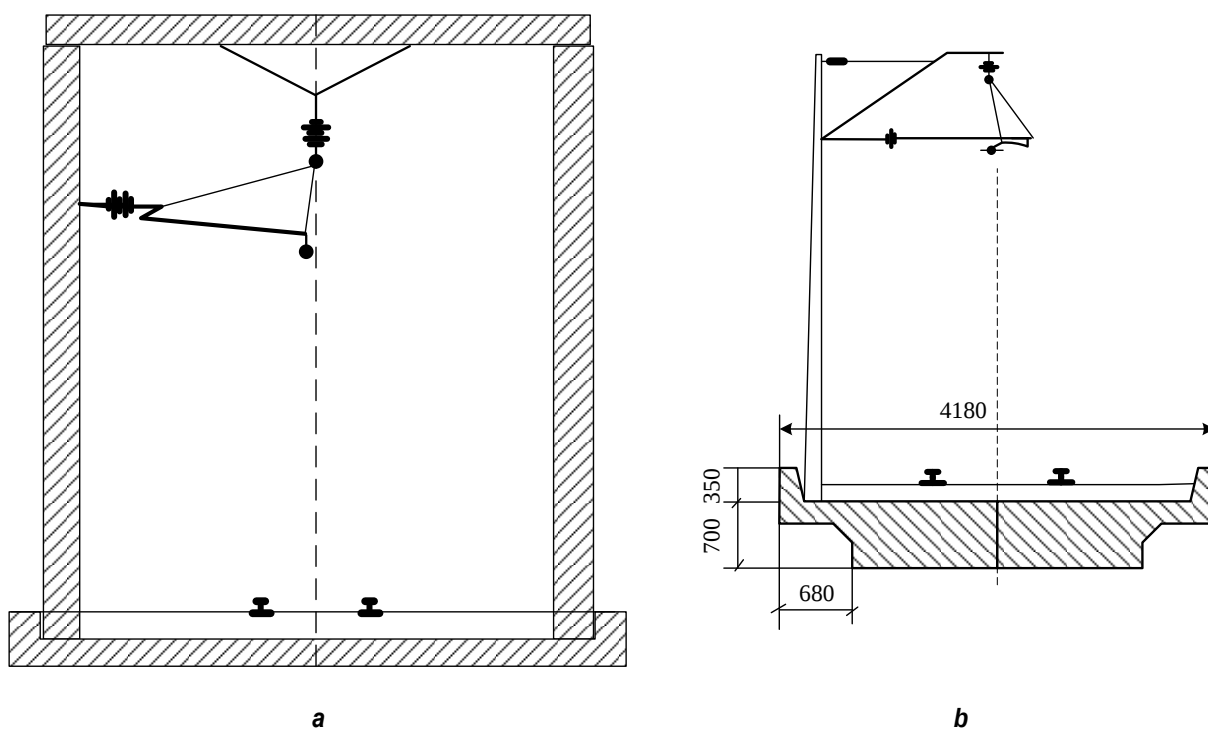


Рис. 1. Сечения железнодорожных мостов:
а – мост с ездой понизу; б – мост с ездой поверху
Fig. 1. Cross sections of railway bridges:
а – bottom-road bridge; б – deck-type bridge

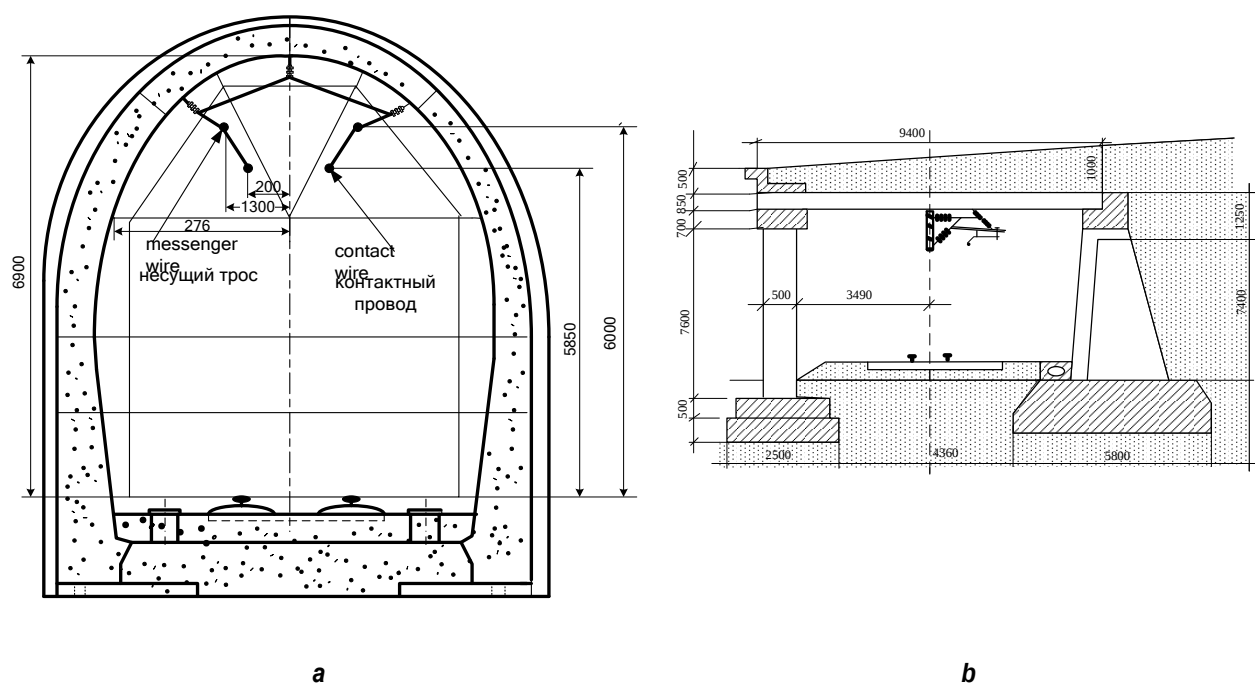


Рис. 2. Сечения тоннеля (а) и галереи (б)
Fig. 2. Cross section of a tunnel (а) and a gallery (б)

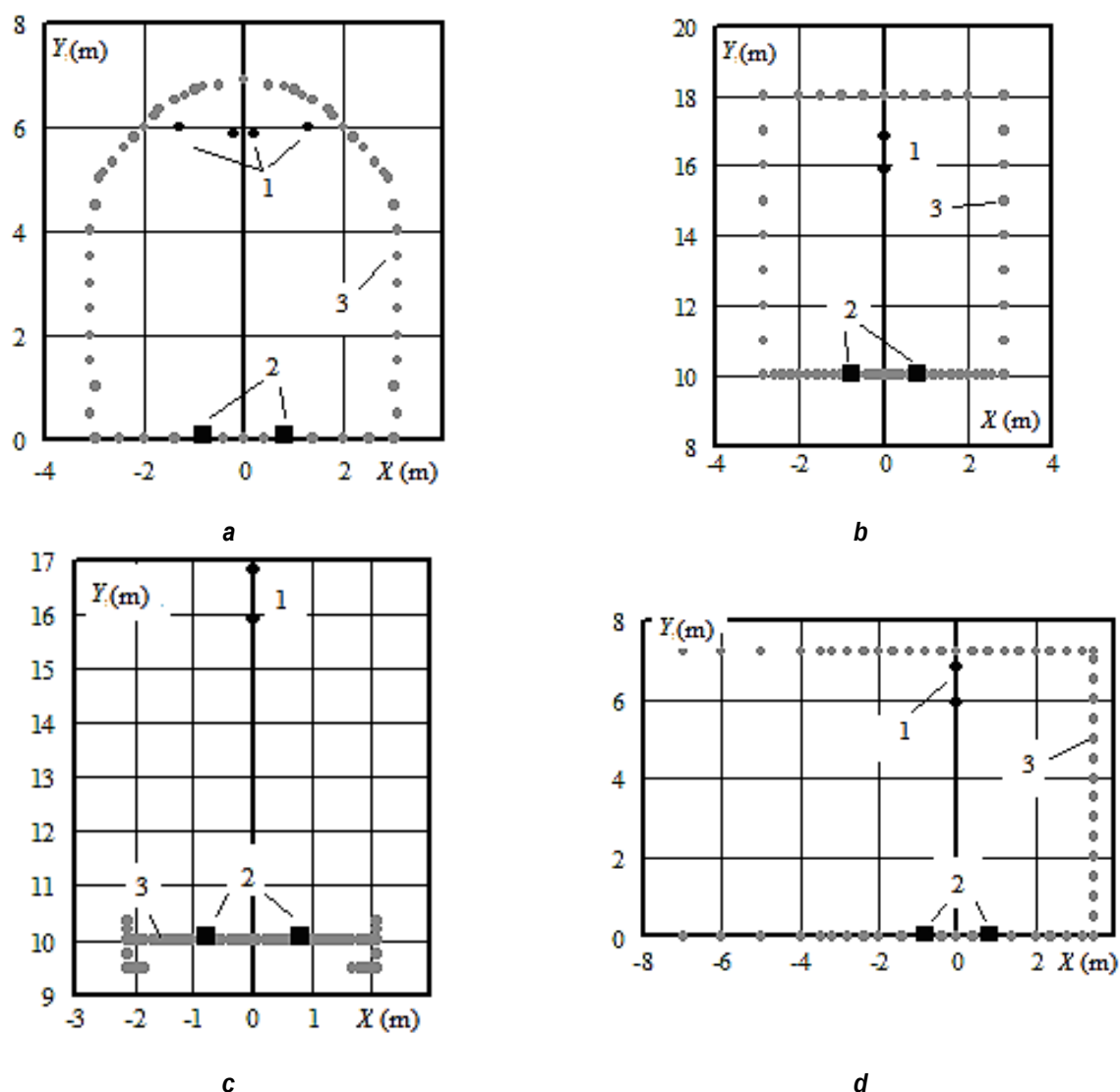


Рис. 3. Координаты проводов, моделирующих искусственные сооружения:
а – тоннель; б – мост с ездой понизу; с – мост с ездой поверху; д – галерея;
1 – провода контактной подвески; 2 – рельсовые нити; 3 – провода, моделирующие профиль искусственного сооружения

Fig. 3. Coordinates of wires simulating engineering structures:
а – tunnel; б – bottom-road bridge; с – deck-type bridge; д – gallery; 1 – contact wires of a catenary system;
2 – rails; 3 – wires simulating the profile of an engineering structure

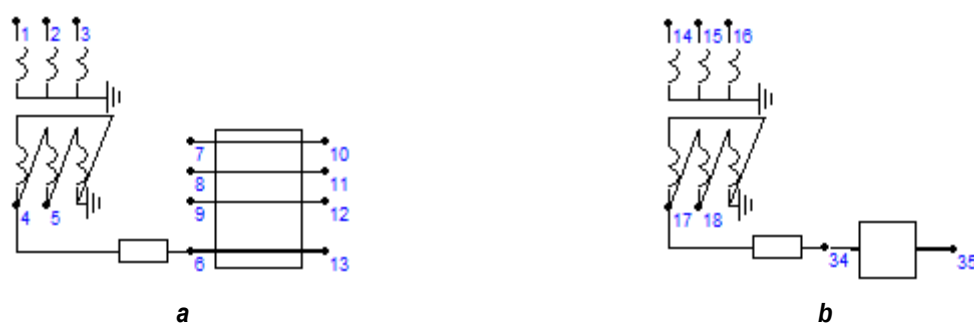


Рис. 4. Схемы расчетных моделей: а – для плоского рельефа;
б – для тоннеля, галереи и мостов

Fig. 4. Diagrams of design models: а – for flat ground; б – for a tunnel, gallery and bridges

Проведенный анализ токораспределения показал неравномерность токов по арматуре тоннеля и галереи и сравнительную их однородность для металлических частей моста. Токи проводников моделей тоннеля и галереи больше у тех проводников, которые расположены ближе к проводам контактной сети. Эти токи при условии хорошего заземления достигают величин в десятки ампер.

Результаты расчетов электрического и магнитного полей, а также вектора Пойнтинга на высоте расположения точек наблюдения в 1,8 м от железнодорожного полотна представлены в таблице и на рис. 5–11.

Максимумы составляющих и амплитуд напряженностей
Maximum values of EMF strength components and amplitudes

Условия трассы	E , kV/m			H , A/m		
	E_X	E_Y	E_{MAX}	H_X	H_Y	H_{MAX}
Плоский рельеф	0,29	1,86	2,63	34,24	4,06	48,42
Галерея	0,41	0,82	1,17	8,71	4,48	12,39
Мост с ездой поверху	0,05	2,06	2,92	34,05	2,62	48,16
Мост с ездой понизу	0,45	0,83	1,18	9,88	4,81	13,98
Тоннель	0,61	1,06	1,51	5,65	3,26	7,99

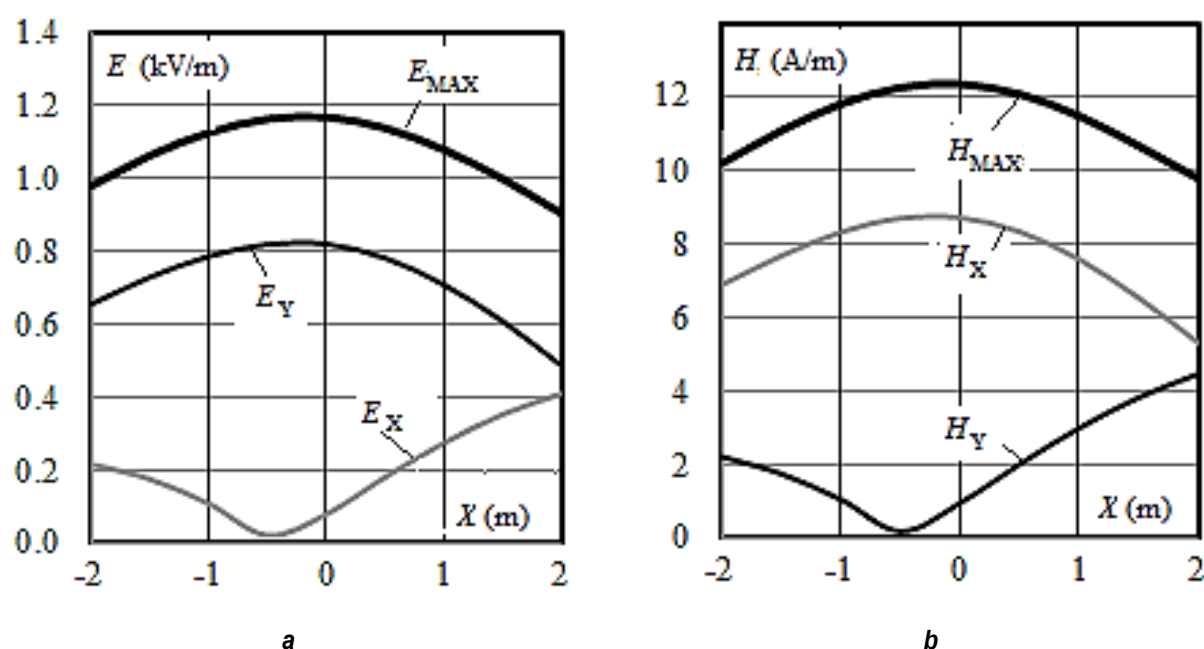


Рис. 5. Зависимости составляющих напряженности ЭМП от координаты X для ТС на галерее:
а – электрическое поле; б – магнитное поле

Fig. 5. Dependences of EMF strength components on X -coordinate for the gallery traction network:
a – electric field; b – magnetic field

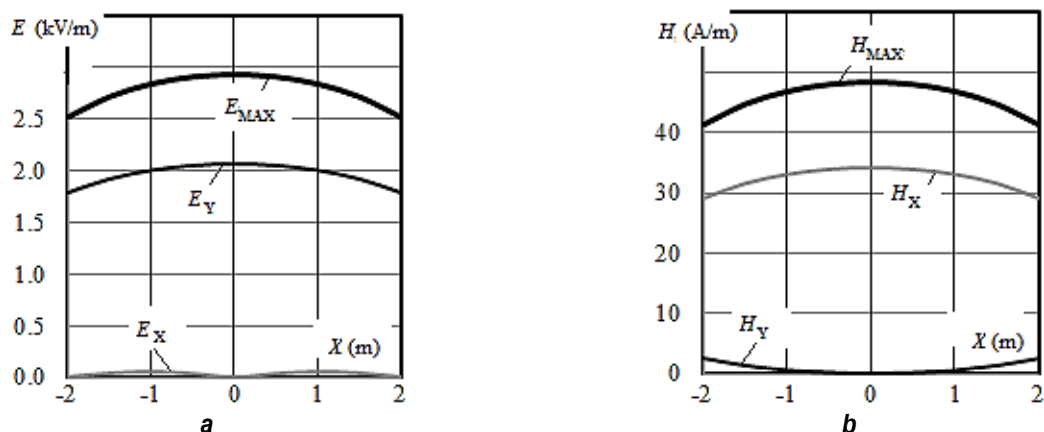


Рис. 6. Зависимости составляющих напряженности ЭМП от координаты X для ТС на мосту с ездой поверху: а – электрическое поле; б – магнитное поле
Fig. 6. Dependences of EMF strength components on X -coordinate for deck-type bridge traction network: а – electric field; б – magnetic field

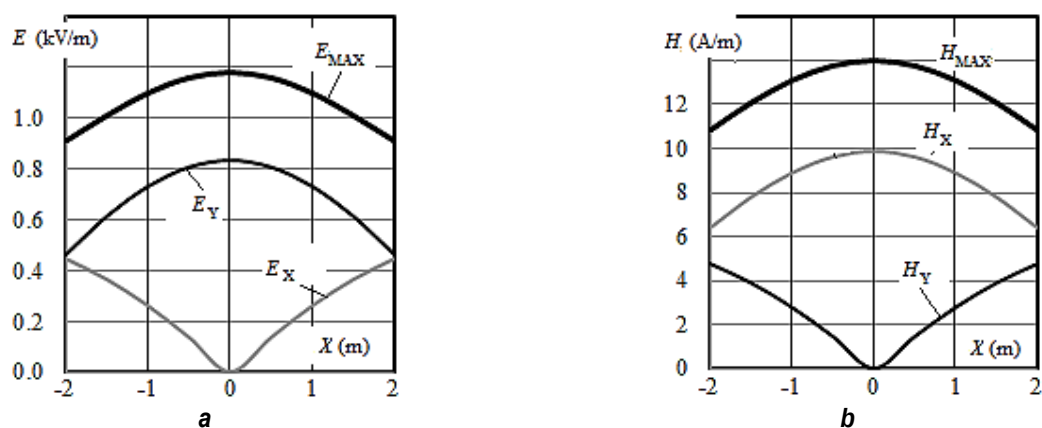


Рис. 7. Зависимости составляющих напряженности ЭМП от координаты X для ТС на мосту с ездой понизу: а – электрическое поле; б – магнитное поле
Fig. 7. Dependences of EMF strength components on X -coordinate for the bottom-road bridge traction network: а – electric field; б – magnetic field

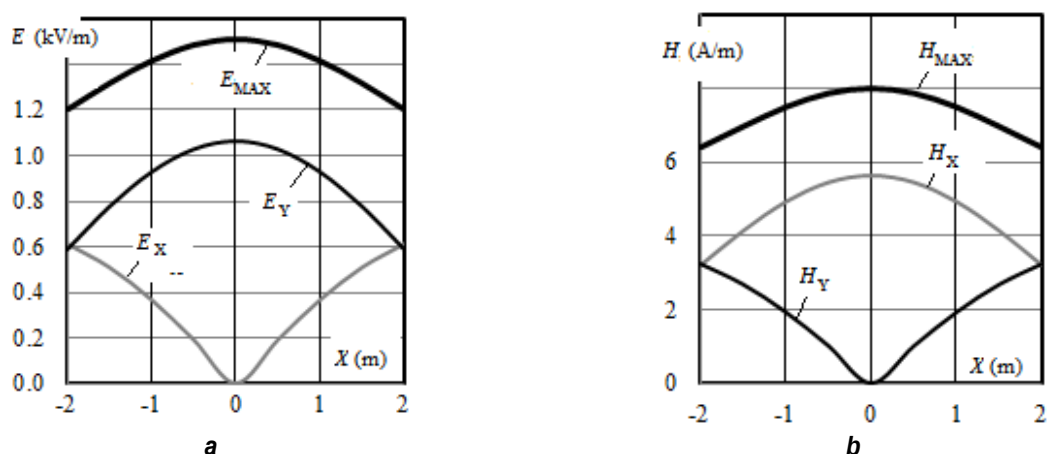


Рис. 8. Зависимости составляющих напряженности ЭМП от координаты X для ТС в тоннеле: а – электрическое поле; б – магнитное поле
Fig. 8. Dependences of EMF strength components on X -coordinate for tunnel traction network: а – electric field; б – magnetic field

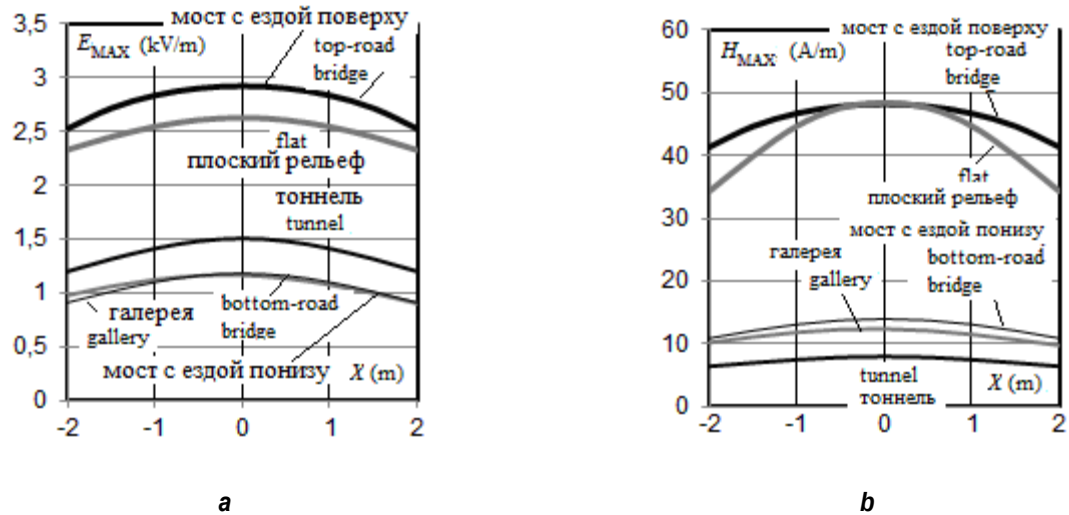


Рис. 9. Сводный график зависимости составляющих напряженности ЭМП от координаты X:
а – электрическое поле; б – магнитное поле

Fig. 9. Summary diagram of EMF strength components dependence on X-coordinate:
a – electric field; b – magnetic field

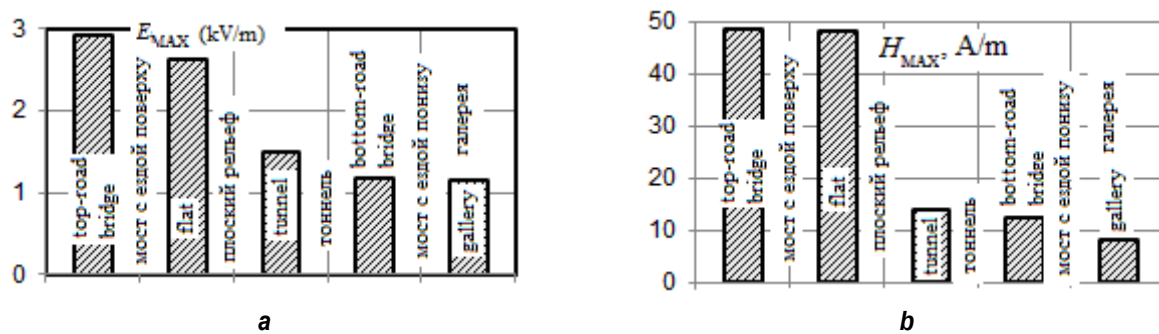


Рис. 10. Сравнение максимальных значений амплитуд напряженности ЭМП:
а – электрическое поле; б – магнитное поле

Fig. 10. Comparison of maximum values of EMF strength amplitudes:
a – electric field; b – magnetic field

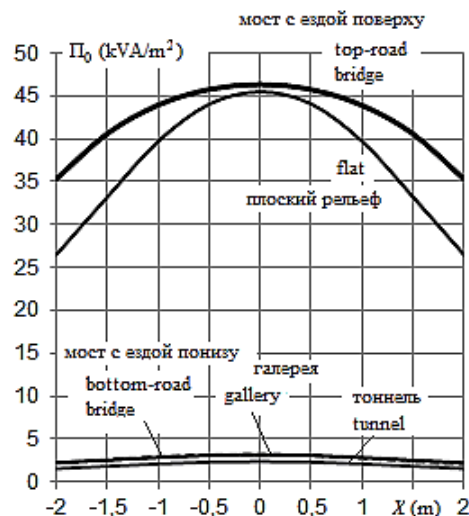


Рис. 11. Сравнение плотности потока электромагнитной энергии
Fig. 11. Comparison of flux density of electromagnetic energy



Результаты моделирования ЭМП в искусственных сооружениях железнодорожного транспорта показывают, что на высоте 1,8 м от железнодорожного полотна наибольшими электрическими и магнитными полями характеризуется мост с ездой поверху, напряженности полей которого выше, чем на открытом пространстве. Тоннель, мост с ездой понизу и галерея характеризуются гораздо меньшими ЭМП и более низкими потоками электромагнитной энергии, что связано с близостью к контактной сети экранирующих металлических конструкций этих сооружений. Передача энергии электромагнитным полем в трех последних конструкциях происходит в ограниченном пространстве между контактной сетью и расположенными поблизости заземленными конструкциями.

Заключение

В статье представлены методика и результаты моделирования электромагнитных полей в тяговых сетях участков железных дорог, проходящих в искусственных сооружениях: галереях, мостах, тоннелях. Показано, что наличие заземленных проводящих объектов существенно изменяет картину распределения напряженностей электромагнитного поля в пространстве по сравнению с ситуацией расположения тяговой сети в открытом пространстве с плоским рельефом земной поверхности.

Библиографический список

1. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Расчеты электромагнитных полей. М.: Маршрут, 2006. 992 с.
2. Сидоров А.И., Окраинская И.С. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения. Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. 204 с.
3. Гуревич В. Проблема электромагнитных воздействий на микропроцессорные устройства релейной защиты. Часть 1 // Компоненты и технологии. 2010. № 2 (103). С. 80–84.
4. Цицикян Г.Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. СПб.: Элмор, 2007. 184 с.
5. Аполлонский С.М. Проблемы электромагнитной безопасности на электрифицированной железной дороге. В 2 т. Электромагнитная безопасность на железной дороге с переменным током в тяговой сети. М.: РУСАЙНС, 2017. Т. 2. 414 с.
6. Буюкова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск: Изд-во Ангарского государственного технического университета, 2018. 382 с.
7. Белинский С.О. Экспериментальная оценка параметров электромагнитных полей // Мир транспорта. 2014. № 5. С. 178–191.
8. Закирова А.Р., Кузнецов К.Б. Оценка ЭМП на рабочих местах электротехнического персонала тягового электроснабжения // Транспорт Урала. 2013. № 3 (38). С. 112–117.
9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Buyakova N.V. Improvement of Electromagnetic Environment in Traction Power Supply Systems // The power grid of the future / Proceeding. Otto–von–Guericke University Magdeburg. Magdeburg. 2013. No. 2. P. 39–44.
10. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008. 334 p.
11. Biesenack H., Braun E., George G. Energieversorgung elektrischer bannen. Wiesbaden: B.G. Teubner Verlag. 2006. 732 p.
12. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. Springer, 2013. 529 p.
13. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM // EMC09. Kyoto, 2009. P. 567–570.
14. Hill R.J. Modelling and simulation of electric railway traction, track signalling and power systems // Transactions on the Built Environment. 1994. Vol. 6. P. 383–390.
15. Mandić M., Uglešić I., Milardić V. Design and testing of 25 kV ac electric railway power supply systems // Tehnički vjesnik 20, 3(2013). P. 505–509.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems // Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008. Beijing: China Railway Publishing House, 2008. P. 504–508.



References

1. Apollonsky S.M., Gorsky A.N. *Raschety elektromagnitnykh polej* [Electromagnetic field calculations]. Moscow: Marshrut Publ., 2006. 992 p. (In Russian)
2. Sidorov A.I., Okrainskaya I.S. *Elektromagnitnye polya vblizi elektroustanovok sverhвысокoго napryazheniya* [Electromagnetic fields near electric installations of extra-high voltage]. Chelyabinsk: South Ural State University Publ., 2008. 204 p. (In Russian)
3. Gurevich V. Problem of electromagnetic impacts on microprocessor devices of relay protection. Part 1. *Komponenty i tehnologii* [Components and Technologies], 2010, no. 2 (103), pp. 80–84. (In Russian)
4. Tsitsikyan G.N. *Elektromagnitnaya sovmestimost' v elektroenergetike* [Electromagnetic compatibility in electric power industry]. Saint-Petersburg: Elmor Publ., 2007, 184 p. (In Russian)
5. Apollonsky S.M. *Problemy elektromagnitnoy bezopasnosti na elektrificirovannoy zheleznoj doroge. Elektromagnitnaya bezopasnost' na zheleznoj doroge s peremennym tokom v tyagovoy seti* [Problems of electromagnetic safety on the electrified railroad. Electromagnetic safety on an AC railroad in the traction network]. Moscow: RUSAJNS Publ., 2017, vol. 2, 414 p. (In Russian)
6. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemah elektrosnabzheniya zhelezných dorog: modelirovanie i upravlenie* [Electromagnetic safety in railway power supply systems: simulation and control]. Angarsk: Angarsk State Technical University Publ., 2018, 382 p. (In Russian)
7. Belinsky S.O. Experimental evaluation of parameters of electromagnetic fields. *Mir transporta* [World of Transport], 2014, no. 5, pp. 178–191. (In Russian)
8. Zakirova A.R., Kuznetsov K.B. Evaluation of electromagnetic fields at workplaces of traction power supply electrical workers. *Transport Urala* [Transport of the Urals], 2013, no. 3 (38), pp. 112–117. (In Russian)
9. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Buyakova N.V. Improvement of Electromagnetic Environment in Traction Power Supply Systems. The power grid of the future. Proceeding No. 2. Otto–von–Guericke University Magdeburg. Magdeburg, 2013, pp. 39–44.
10. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008, 334 p.
11. Biesenack H., Braun E., George G. *Energieversorgung elektrischer bannen*. Wiesbaden: Verlag B.G. Teubner, 2006, 732 p.
12. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways*. Springer, 2013, 529 p.
13. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. EMC09. Kyoto, 2009, pp. 567–570.
14. Hill R.J. Modelling and simulation of electric railway traction, track signalling and power systems. *Transactions on the Built Environment*, 1994, vol. 6, pp. 383–390.
15. Mandić M., Uglešić I., Milardić V. Design and testing of 25 kV ac electric railway power supply systems. *Tehnički vjesnik* 20, 3(2013), pp. 505–509.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Multifunctional Mathematical Models of Railway Electric Systems. *Innovation & Sustainability of Modern Railway – Proceedings of ISMR'2008*. Beijing: China Railway Publishing House, 2008, pp. 504–508.

Критерии авторства

Буякова Н.В. выполнила компьютерное моделирование электромагнитных полей. Закарюкин В.П. разработал компьютерные модели тяговых сетей, проходящих в искусственных сооружениях. Крюков А.В. предложил методику моделирования, проанализировал полученные результаты, подготовил текст статьи. Авторы в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Buyakova N.V. has performed computer modeling of electromagnetic fields. Zakaryukin V.P. has developed computer models of traction networks located in artificial constructions. Kryukov A.V. has developed a modeling technique, performed the analysis of the obtained results, prepared the manuscript. The authors bear equally responsible 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 628.9; 621.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-152-161>

КОММУТАТОР СЕТЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫМИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫМИ ПРИБОРАМИ С ПОМОЩЬЮ НИЗКОЧАСТОТНОЙ PLC-ТЕХНОЛОГИИ

© С.М. Копытов¹, А.В. Ульянов², Р.В. Шибеко³

Комсомольский-на-Амуре государственный университет,
681013, Российская Федерация, г. Комсомольск-на-Амуре, пр-т Ленина, 27.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Рассматривается вариант модернизации низкочастотной технологии Power Line Communications (PLC) для адресного управления светодиодными светильниками в протяженной системе освещения, позволяющий уменьшить влияние передаваемых данных на показатели качества электроэнергии.

МЕТОДЫ. В настоящее время при применении низкочастотной технологии PLC для передачи данных вырезают отдельные полуволны сетевого напряжения или их части, что приводит к существенному ухудшению качества электроэнергии. Для уменьшения негативного влияния на показатели качества электроэнергии предложено использовать маркер данных в виде одного периода сетевого напряжения с пониженной амплитудой. Для формирования такого маркера и передачи данных разработаны и апробированы схемы силовых коммутаторов с искусственной коммутацией. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** По результатам экспериментальных исследований подтверждены работоспособность предложенных силовых коммутаторов и метода передачи данных, а также его щадящего влияния на электрическую сеть. **ВЫВОДЫ.** Предложенные решения силовых коммутаторов в меньшей степени влияют на диммируемые блоки питания светодиодных светильников, а также на показатели качества электроэнергии. Их можно использовать как для уличного диммируемого освещения, так и в условиях предприятий, где применение высокочастотной PLC-технологии недопустимо.

Ключевые слова: PLC-технология, маркер, силовой коммутатор, MOSFET транзистор, диммер, транзисторная оптопара, выпрямительный диод.

Информация о статье. Дата поступления 28 июня 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибеко Р.В. Коммутатор сетевого напряжения для управления светодиодными осветительными приборами с помощью низкочастотной PLC-технологии // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 152–161. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-152-161

NETWORK VOLTAGE SWITCH TO CONTROL LED LIGHTING APPLIANCES USING LOW-FREQUENCY PLC-TECHNOLOGY

S.M. Kopytov, A.V. Ulianov, R.V. Shibeko

Komsomolsk-on-Amur State University,
27, Lenin pr., Komsomolsk-on-Amur, 681013, Russian Federation

¹Копытов Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, e-mail: skopytov@mail.ru

Sergey M. Kopytov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics, e-mail: skopytov@mail.ru

²Ульянов Александр Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленной электроники, e-mail: ulianov2@mail.ru

Alexander V. Ulianov, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Industrial Electronics, e-mail: ulianov2@mail.ru

³Шибеко Роман Владимирович, старший преподаватель кафедры промышленной электроники, e-mail: v394-7@mail.ru

Roman V. Shibeko, Senior Lecturer of the Department of Industrial Electronics, e-mail: v394-7@mail.ru



ABSTRACT. PURPOSE. The paper deals with an upgrading variant of the low-frequency technology of Power Line Communications (PLC) for targeted control of LED lighting in a long-length lighting system. It allows to reduce the influence of transmitted data on the quality indicators of electrical power. **METHODS.** Today the use of low-frequency PLC technology for data transmission is accompanied with cutting off some separate half-waves of the mains voltage or their parts. This leads to a significant deterioration in the quality of electrical power. To reduce the negative impact on power quality indicators it is suggested to use a data marker in the form of a single period of the mains voltage with a reduced amplitude. The schemes of power switches with artificial commutation have been developed and tested to form such a marker and transfer data. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The results of experimental studies prove the efficiency of the developed power switches and the proposed method of data transmission as well as its partial load effect on the electrical network. **CONCLUSIONS.** The proposed solutions of power switches have a smaller effect on dimmable power supplies of LED fixtures and on power quality indicators. They can be used both for street dimmable lighting and in the factories where high-frequency PLC technology is prohibited.

Keywords: PLC-technology, marker, power switch, metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET), dimmer, transistor optocoupler, rectifier diode

Information about the article. Received June 28, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Kopytov S.M., Ulianov A.V., Shibeko R.V. Network voltage switch to control LED lighting appliances using low-frequency PLC-technology. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 152–161. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-152-161 (In Russian)

Введение

Проблеме повышения эффективности энергопотребления уделяется особое внимание. Одним из направлений этой деятельности является вытеснение ламп накаливания более экономичными источниками света, например, светодиодными лампами. Следующим шагом в этом направлении является переход от реализации простой функции включения/выключения к гибкому управлению системами освещения.

В Комсомольском-на-Амуре государственном университете проводятся работы по созданию систем интеллектуального освещения, в которых управление осветительными приборами осуществляется при помощи модифицированной низкочастотной PLC-технологии. Технология PLC (Power Line Communication) обеспечивает передачу данных по линиям электропере-

дачи. В традиционной низкочастотной PLC-технологии в качестве маркеров, отмечающих границы пакетов данных, используются отсутствующие полуволны сетевого напряжения, а сами данные определяются числом полуволн между маркерами. Вырезанные полуволны искажают форму сетевого напряжения, создают помехи в сети, влияют на работу диммеров и блоков питания светильников, могут приводить к мельканию освещения. Особенностью модифицированной низкочастотной PLC-технологии является сохранение полуволны на месте маркера с незначительным уменьшением ее амплитуды. Для реализации такого решения потребовалась существенная переработка схемы силового PLC-коммутатора, отвечающего за выдачу данных в сеть.

Способы управления системами освещения

По статистическим данным на внешнее и внутреннее освещение затрачивается более 10% всей вырабатываемой в стране электроэнергии. Следовательно, повышение энергоэффективности систем освещения является актуальной задачей.

Большинство отечественных систем освещения устарело морально и физически. Чаще всего это локальные линии без центрального мониторинга, которые управляются таймерами или фотодатчиками [1, 2]. Такие линии позволяют реализовы-

вать только функцию освещения «включено/выключено». Коммутация производится контакторами или магнитными пускателями, а в некоторых случаях – просто механическими выключателями.

Моральное обновление систем освещения заключается не только в применении новой элементной базы, но и в «интеллектуализации» освещения. Современные требования к освещению предполагают возможность гибкого управления элементами освещения (изменение уровня светового потока от светильника, настройку конфигурации освещения объекта), а также наличие дополнительных функций (диагностику неисправности светильников, анализ присутствия потребителей освещения, настройку спектра и т.д.).

На рис. 1 приведен вариант структурной схемы одноканальной системы интеллектуального уличного освещения, использованы следующие обозначения: ЦМиУ – центр мониторинга и управления; ДУУ – датчики условий управления; БОИ – блок обмена информацией с ЦМиУ; РМ – регулятор мощности; ОЭ – осветительный элемент; ОП – осветительный прибор; КУ – канал управления.

ЦМиУ адресно управляет ОЭ и собирает информацию об энергопотреблении линии. В качестве ДУУ могут быть использованы датчики освещенности и присутствия, данные которых ЦМиУ учитывает при управлении. РМ устанавливает мощность, поступающую в осветительный элемент.

В данной структуре для передачи команд управления используется отдельный канал управления. Кроме того, решение по конфигурации освещенности прини-

мается исходя из результатов опроса одного датчика. Структура может быть полезна, например, при освещении улицы с малой интенсивностью движения в ночное время. Яркость светильников вдоль улицы может уменьшаться в часы минимального движения (кроме освещения перекрестков).

Вариант структурной схемы многоканальной системы интеллектуального уличного освещения приведен на рис. 2, где использованы дополнительные обозначения: КО – контроллер освещения; КС – канал связи.

При мониторинге и управлении одновременно несколькими линиями освещения встает проблема удаленности ЦМиУ от ОП. В определенных ситуациях функции управления отдельной линией можно отдать контроллерам освещения. Именно их задача адресно управлять ОЭ, осуществлять диагностику ОЭ в своей линии, осуществлять мониторинг и передавать информацию в ЦМиУ по КС. При необходимости ЦМиУ может выдавать специальные команды, например, включить все светильники на максимум. Дополнительную гибкость системе придает распределенное расположение ДУУ.

Такая многоканальная система уличного освещения удобна при использовании на длинных трассах с малой интенсивностью движения в ночное время суток. Периодическое расположение ДУУ позволяет обнаружить местоположение потребителей освещения и создать впереди автомобиля «волну» освещения. Остановка световой «волны» может свидетельствовать об аварийной ситуации, что является дополнительной полезной функцией, например, для длинных тоннелей.

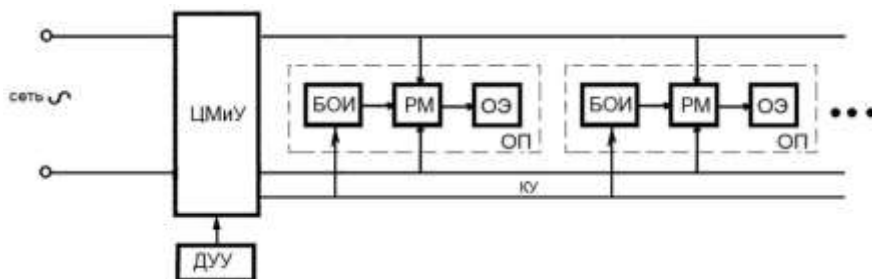


Рис. 1. Структурная схема одноканальной системы уличного освещения
Fig. 1. Structural diagram of single-channel street lighting system

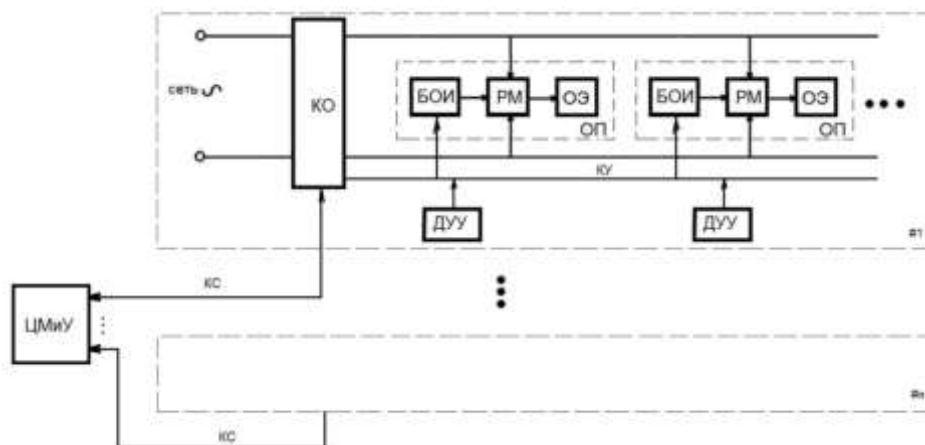


Рис. 2. Структурная схема многоканальной системы уличного освещения
Fig. 2. Structural diagram of a multichannel street lighting system

В приведенных выше структурах ОП и ДУУ связаны с центральными блоками отдельными КУ. Дальность таких линий связи без применения промежуточных усилителей сигналов управления невелика. Именно поэтому такие протоколы, как DALI и DMX512, используют чаще всего в интерактивных локальных светодиодных осветительных системах, например: DMX 512 используют в сценическом освещении, а DALI – в освещении фасадов зданий [3].

В случае протяженных систем освещения целесообразно отказаться от отдельных каналов управления и использовать для передачи команд управления сами силовые сети, применяя технологию PLC [2–9]. На сегодняшний день чаще всего используются два способа передачи данных по силовым сетям:

- с модуляцией основной гармоники питающего напряжения;
- с модуляцией наложенного напряжения повышенной частоты.

В определенных условиях – при наличии протяженных линий или при наличии в осветительных приборах входных высокочастотных фильтров, применять второй способ передачи данных не представляется возможным. Использование для передачи данных основной гармоники питающего напряжения хотя и требует больших затрат времени, но во многих случаях более предпочтительно.

Известно несколько способов изме-

нения формы сетевого напряжения [1–14], среди которых:

- «вырезание» целой полуволны напряжения [2, 5];
- «вырезание» части полуволны с формированием «угла отсечки» [10].

При «вырезании» целой полуволны информация может кодироваться:

1) двоичными цифрами, зависящими от формы периода напряжения сети (период с отсутствующей полуволной – логический «0», а период с полной синусоидой – логическая «1»);

2) одиночным «вырезом» полуволны, означающим команду для всех регуляторов мощности изменить силу света светильника пошагово [2, 5, 9];

3) количеством полуволн основной гармоники напряжения, прошедших между двумя отсутствующими полуволнами (маркерами).

Во всех случаях спектральный состав напряжения сети зависит от передаваемой информации и в некоторых случаях может не соответствовать нормам качества электроэнергии и нормам электромагнитной совместимости. Кроме того, во втором случае отсутствует гибкость управления освещением и возможность диагностики светильников. Первый и третий способы позволяют управлять каждым светильником по отдельности.

При сравнении первого и третьего способов кодирования можно сделать вы-

вод, что первый способ в большей степени искажает форму сетевого напряжения, поскольку вероятность появления логического нуля близка к 50% при передаче произвольных числовых значений. В третьем же

способе данные кодируются числом «обычных» полуволн, а искажающие сеть маркеры определяют лишь границы пакетов «обычных» полуволн.

Разработка и исследование силового PLC-коммутатора

Для управления осветительными приборами нами выбран третий способ кодирования, который в наименьшей степени влияет на сеть. Кроме того, предложено изменить форму маркера, приблизив его вид к форме «обычной» синусоиды.

Структурная схема системы освещения с передачей команд управления по силовой сети приведена на рис. 3, где использованы дополнительные обозначения: СК – силовой коммутатор; Дм – демодулятор; Д – диммер.

Контроллер освещения (КО) управляет всеми ОП посредством СК, который видоизменяет форму сетевого напряжения. Демодулятор (Дм) формирует сигнал управления для диммеров (Д) осветительных приборов (ОП). Диммер изменяет ток потребления осветительных элементов. Основная задача КО состоит в определении моментов времени перехода сетевого напряжения через ноль и в управлении силовым коммутатором для формирования им маркера в определенные периоды сетевого напряжения. Количество полуволн между маркерами воспринимается демодулятором как данные. Между первым и вторым маркером передается адрес осветительного прибора, а между вторым и тре-

тым маркером – значение уровня диммирования для данного прибора.

С целью уменьшения влияния маркера на питающую сеть предложено изменить его форму. Модифицированный маркер представляет собой две смежные полуволны сетевого напряжения, уменьшенные по амплитуде (рис. 4).

Данный способ формирования маркера легко реализуем. Он увеличивает помехоустойчивость при обнаружении маркера демодуляторами. Для выделения маркеров и полуволн данных в простейшем случае может быть использован компаратор, формирующий прямоугольные импульсы цифровых уровней при приходе данных, что позволяет обрабатывать их микроконтроллером. Маркер идентифицируется микроконтроллером демодулятора как отсутствие этих импульсов в течение одного периода сетевого напряжения. Приближенная эпюра выходных импульсов компаратора приведена на рис. 5.

Для формирования модифицированного маркера и пропуска информации полуволн предложен силовой коммутатор переменного напряжения (рис. 6).

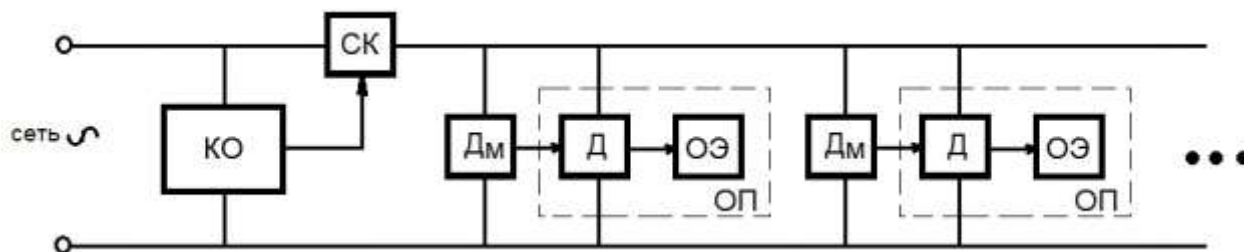


Рис. 3. Структурная схема системы освещения с передачей команд по силовой сети
Fig. 3. Structural diagram of the lighting system with command transmission
via the power network



Рис. 4. Осциллограмма модифицированного маркера,
снятая на экспериментальном стенде

Fig. 4. Modified marker oscillogram recorded on the experimental test stand

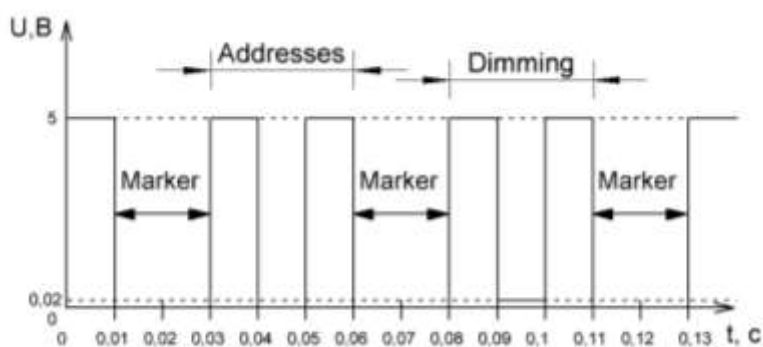


Рис. 5. Эюра выходных импульсов компаратора

Fig. 5. Diagram of comparator output pulses

Силовой коммутатор подключают в разрыв линии питания светильников через верхний разъем. Сигналы формирования маркеров поступают через левый разъем и транзисторную оптопару U1 от контроллера освещения.

В коммутаторе использованы мощные MOSFET-транзисторы с каналом n-типа. Диодный мост VD1-4 предназначен для получения односторонней направленности сетевого тока через транзисторы. Коммутирующая схема размещена в диагонали диодного моста. Транзистор VT1 работает в режиме ключа, а транзистор VT2, пропуская ток, «гасит» часть сетевого напряжения для формирования маркера, когда VT1 закрыт.

Регулировка проводимости канала транзистора VT2 осуществляется резисторами R6 и R7. От нее зависит, в какой мере уменьшится амплитуда полуволн при передаче маркера. Заменяв резистор R7 сопротивлением, зависящим от тока нагрузки, можно компенсировать зависимость амплитуды маркера от числа осветительных приборов.

В схеме коммутатора использованы следующие элементы:

- MOSFET-транзисторы IRL3705N (N-канал, 55 В, 89 А, $R_{ds} = 0,01$ Ом, корпус TO-220);
- выпрямительные диоды 10A10 (10 А, 1000 В, корпус R-6);
- транзисторная оптопара PC817.

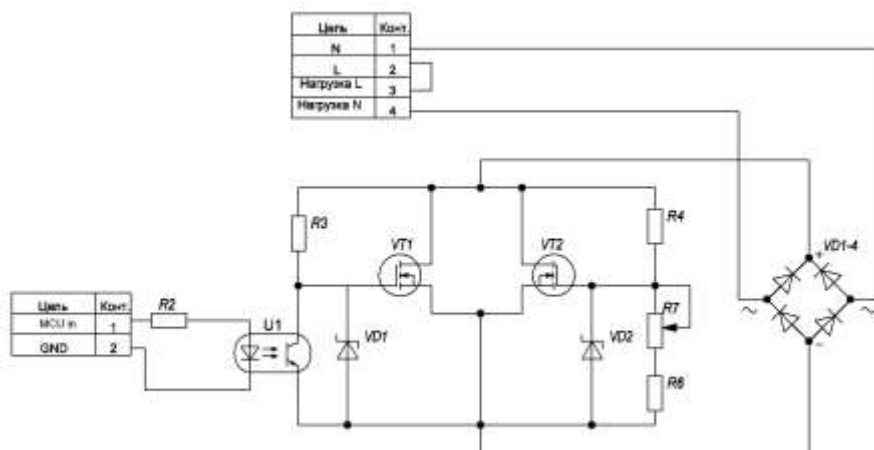


Рис. 6. Силовой коммутатор переменного напряжения на MOSFET транзисторах
Fig. 6. Power MOSFET switch of alternating voltage

Изготовленный силовой коммутатор апробирован на экспериментальном стенде, приведенном на рис. 7.

Кроме силового коммутатора экспериментальный стенд включает персональный компьютер и контроллер освещения. С помощью терминальной программы, написанной на языке LabVIEW, с компьютера на контроллер освещения подаются команды, содержащие номер светильника и уровень его интенсивности света. Контроллер освещения отслеживает моменты перехода сетевого напряжения через ноль, отсчиты-

вает необходимое число полуволн и подает сигналы, которые служат для формирования маркеров, на силовой коммутатор.

Тестовая осциллограмма сетевого напряжения в режиме непрерывного формирования маркеров силовым коммутатором приведена на рис. 8. Заметно, что вблизи моментов времени перехода через ноль имеются небольшие участки насыщения напряжения, которые появляются из-за особенностей открывания полевых транзисторов.

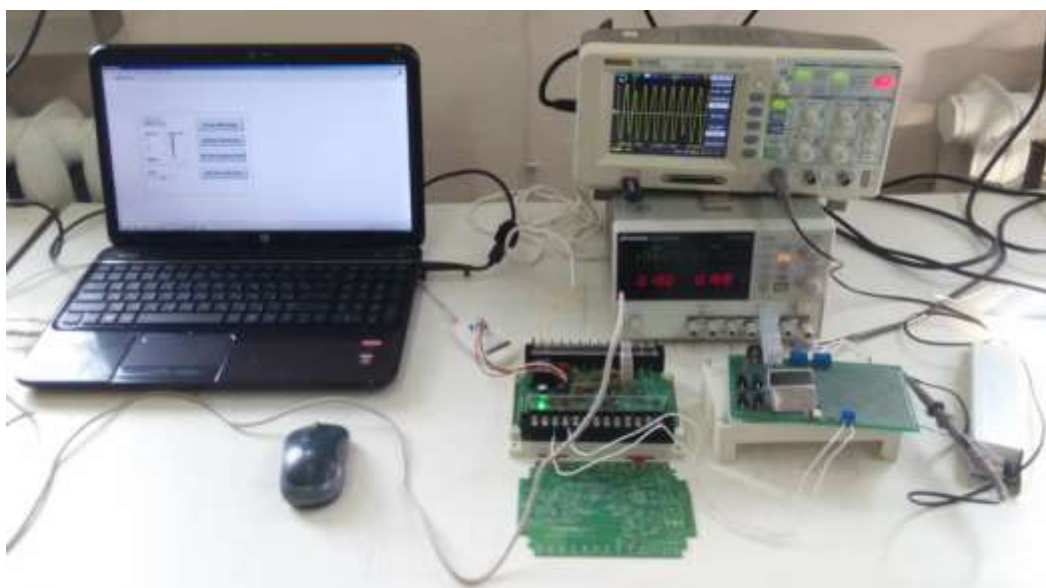


Рис. 7. Экспериментальный стенд
Fig. 7. Experimental test stand



Среднеквадратичное значение напряжения маркера выбрано из минимально допустимого входного напряжения диммера. В качестве диммера использован диммируемый блок питания для светодиодного освещения ИПС50-350ТУ, соединенный со светодиодной линейкой с током потребления 350 мА. Технические параметры блока питания следующие: напряжение питания – 150–280 В; выходное напряжение – 50–140 В; выходной ток – 350 мА; мощность – 50 Вт; тип стабилизации – по току.

В качестве альтернативной схемы силового коммутатора предложена схема, приведенная на рис. 9.

В данной схеме при закрытом транзисторе VT1 часть сетевого напряжения падает на батареи мощных выпрямительных диодов VD1–VD22, включенных в прямом направлении. Преимуществом схемы является малая зависимость падения напряжения на диодах от проходящего тока, т.е. от числа активированных осветительных приборов, недостатком – большое число дискретных элементов.

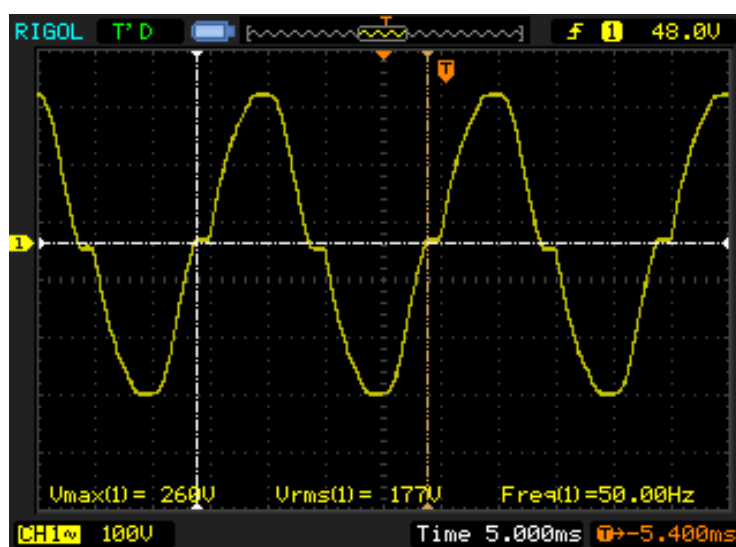


Рис. 8. Тестовая осциллограмма сетевого напряжения в режиме непрерывного формирования маркеров силовым коммутатором

Fig. 8. Test oscillogram of the mains voltage in the mode of continuous generation of markers by a power switch

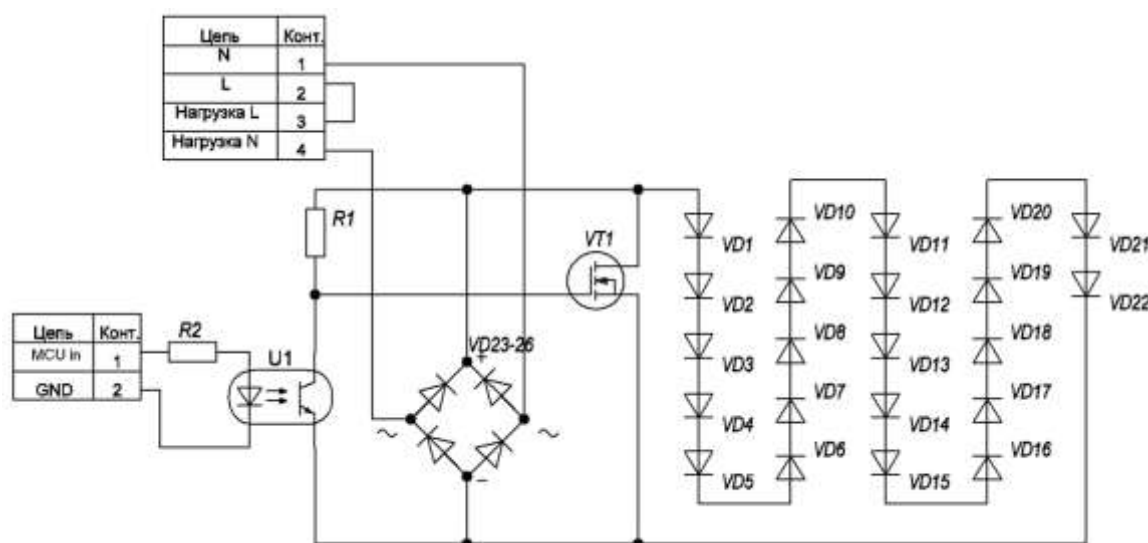


Рис. 9. Силовой коммутатор переменного напряжения на выпрямительных диодах
Fig. 9. Power switch of alternating voltage on rectifier diodes



Гальваническую развязку в схемах на рис. 6 и 9 осуществляет транзисторная оптопара, при этом напряжение на фототранзисторе оптопары не превышает паде-

ния напряжения на «гасящих» напряжение элементах. Оптопары с такими техническими характеристиками широко распространены.

Заключение

Таким образом, предложенные схемы силовых коммутаторов предпочтительны тем, что в меньшей степени влияют на диммируемые блоки питания светодиодных светильников, поскольку напряжение питания этих блоков лежит в диапазоне от 150 до 280 В. Поэтому при передаче команд управления осветительным приборам не будет наблюдаться изменений световых потоков. Их можно использовать как для уличного диммируемого освещения, так и в условиях предприятий, где применение высокочастотной PLC-технологии недопустимо.

Повышенное выделение тепла на «гасящих» напряжение элементах (диоды, транзистор) не является существенной проблемой, так как большую часть времени транзисторный ключ шунтирует «гасящую» цепь. При этом работа «гасящей» цепи не продолжительна (период сетевого напря-

жения). Кроме того, в зависимости от потребляемой мощности силовой коммутатор может быть оснащен элементами пассивного охлаждения.

Помехозащищенность передачи данных зависит от надежности распознавания маркера и от стабильности его амплитуды в зависимости от числа осветительных приборов, подключенных к линии. Дальнейшая модификация силового коммутатора позволит построить схему с регулируемой контроллером освещения амплитудой маркера, что при наличии диагностики питающей сети, например, измерения тока, может обеспечить высокую надежность передачи данных.

В настоящее время выполняется разработка новых схем коммутаторов с меньшим числом элементов и других блоков системы интеллектуального освещения.

Библиографический список

1. Бонати А. Энергосбережение посредством интеллектуальных систем светорегулирования // Светотехника. 2009. № 4. С. 41–44.
2. Никуличев А.Ю., Сапронов А.А. Принцип построения эффективных систем управления уличным освещением // Известия вузов. Электромеханика. 2008. Спец. выпуск. С. 135–137.
3. Архитектурная подсветка зданий [Электронный ресурс] // ООО «МегаЛЕД». URL: <http://www.megaled.ru/2014-09-22-18-19-31> (19.09.2018)
4. Тетри Э., Халонен Л. Экономия электроэнергии благодаря энергосберегающему освещению // Светотехника. 2009. № 5. С. 59–64.
5. Никуличев А.Ю., Сапронов А.А. Система управления уличным освещением с использованием передачи информации по сети электроснабжения // Известия вузов. Электромеханика. 2008. Спец. выпуск. С. 137–138.
6. Петрович Н.Т. Передача дискретной информации в каналах с фазовой манипуляцией. М.: Советское радио, 1965. 262 с.
7. Алексеев Е.Г., Шиков С.А., Иванова Е.С. Интегрированные технологии, стандартные интерфейсы и

- протоколы для построения интеллектуальных систем управления освещением // Материалы XXI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (Саранск, 22–29 мая 2017 г.). В 3 ч. Саранск: Изд-во НИ МГУ им. Н.П. Огарёва, 2017. С. 602–610.
8. Ивлиев С.Н., Крылова С.Л., Шиков С.А. Анализ угроз информационной безопасности протоколов и систем управления освещением // Вестник Мордовского университета. 2018. Т. 28. № 1. С. 85–94.
9. Шиков С.А., Алексеев Е.Г., Фадеева А.Ю., Гуреева Е.А. Современные концепции интеллектуальных систем управления освещением // Материалы XXI научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва (Саранск, 22–29 мая 2017 г.). В 3 ч. Саранск: Изд-во НИ МГУ им. Н.П. Огарёва, 2017. С. 126–131.
10. Охрименко В. PLC-технологии [Электронный ресурс] // Время электроники. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer->



r/review/2191/doc/47175/ (19.09.2018)

11. Kaur A., Singh E.P. Paper Machine Automation Using PLC, VFD's and HMI // International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT). 2017. Vol. 6. Issue 05. P. 590–593.
12. Faisal M.A., Aung Z., Williams J.R., Sanchez A. Data stream-based intrusion detection system for advanced metering infrastructure in smart grid: a feasibility study // IEEE Systems Journal. 2015. Vol. 9. No. 1.

P. 31–44. DOI: 10.1109/JSYST.2013.2294120

13. Kiedrowski P. Errors nature of the narrowband PLC transmission in smart lighting LV network // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2016. 9 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9592679>
14. Cheng P., Zhu M. Lightweight anomaly detection for wireless sensor networks // International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015. 8 p. DOI: 10.1155/2015/653232

References

1. Bonati A. Energy saving through intelligent dimming systems. *Svetotekhnika* [Light and Engineering]. 2009, no. 4, pp. 41–44. (In Russian)
2. Nikulichev A.Yu., Sapronov A.A. The principle of building effective street lighting control systems. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2008, special issue, pp. 135–137. (In Russian)
3. *Arkhiturnaya podsvetka zdaniy* [Architectural illumination of buildings]. “Megaled” LLC site. Available at: <http://www.megaled.ru/2014-09-22-18-19-31> (accessed 19 August 2018).
4. Tetri E., Khalonen L. Energy saving due to energy-saving lighting. *Svetotekhnika* [Light and Engineering]. 2009, no. 5, pp. 59–64. (In Russian)
5. Nikulichev A.Yu., Sapronov A.A. Street lighting control system using information transmission via the power supply network. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Russian Electromechanics]. 2008, special issue, pp. 137–138. (In Russian)
6. Petrovich N.T. *Peredacha diskretnoi informatsii v kanalah s fazovoi manipulyatsiei* [Transmission of discrete information in phase shift keying channels]. Moscow: Soviet radio Publ., 1965, 262 p. (In Russian)
7. Alekseev E.G., Shikov S.A., Ivanova E.S. *Integrirovannye tekhnologii, standartnye interfeisy i protokoly dlya postroeniya intellektual'nykh sistem upravleniya osveshcheniem* [Integrated technologies, standard interfaces and protocols for intelligent lighting control system construction]. *Materialy XXI nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov Natsional'nogo issledovatel'skogo Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.P. Ogareva* [Proceedings of XXI scientific and practical conference of young scientists, postgraduate students and students of the National Research Ogarev Mordovia State University]. In 3 parts. Saransk: Ogarev Mordovia state university Publ., 2017, pp. 602–610. (In Russian)
8. Ivliev S.N., Krylova S.L., Shikov S.A. The analysis of

- threats to information security of protocols and lighting control systems. *Vestnik Mordovskogo universiteta* [Mordovia University Bulletin]. 2018, vol. 28, no. 1, pp. 85–94. (In Russian)
9. Shikov S.A., Alekseev E.G., Fadeeva A.Yu., Gureeva E.A. *Sovremennye kontseptsii intellektual'nykh sistem upravleniya osveshcheniem*. Modern concepts of intelligent lighting control systems]. *Materialy XXI nauchno-prakticheskoi konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov Natsional'nogo issledovatel'skogo Mordovskogo gosudarstvennogo universiteta im. N.P. Ogareva* [Materials of XXI scientific and practical conference of young scientists, postgraduate students and students of the National Research Ogarev Mordovia State University]. In 3 parts. Saransk: Ogarev Mordovia state university Publ., 2017, pp. 126–131. (In Russian)
10. Okhrimenko V. *PLC-tehnologii* [PLC technologies]. Website “Electronic time”. Available at: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/2191/doc/47175/> (accessed 19 August 2018).
11. Kaur A., Singh E.P. Paper Machine Automation Using PLC, VFD's and HMI. International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT). 2017, vol. 6, issue 05, pp. 590–593.
12. Faisal M.A., Aung Z., Williams J.R., Sanchez A. Data stream-based intrusion detection system for advanced metering infrastructure in smart grid: a feasibility study. IEEE Systems Journal. 2015, vol. 9, no. 1, pp. 31–44. DOI: 10.1109/JSYST.2013.2294120
13. Kiedrowski P. Errors nature of the narrowband PLC transmission in smart lighting LV network. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2016, 9 p. <http://dx.doi.org/10.1155/2016/9592679>
14. Cheng P., Zhu M. Lightweight anomaly detection for wireless sensor networks. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2015, 8 p. DOI: 10.1155/2015/653232

Критерии авторства

Копытов С.М., Ульянов А.В., Шибек П.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Kopytov S.M., Ulianov A.V., Shibeko P.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 532.546.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-162-172>

ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КРИТИЧЕСКОГО И ДОКРИТИЧЕСКОГО ИСТЕЧЕНИЯ ПАРОВОДЯНОЙ СМЕСИ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ШАРОВЫХ ЧАСТИЦ

© Э.А. Таиров¹, Е.В. Таирова², П.В. Хан³

^{1,3}Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Российская Федерация, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130.

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Дать расчетно-экспериментальное обоснование теоретической модели течения двухфазной парожидкостной смеси в неподвижном слое твердых частиц. Провести сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными по докритическому и критическому истечению пароводяной смеси через различные упаковки шаровых частиц и получить оценку предсказательных возможностей модели. **МЕТОДЫ.** Теоретическое описание опирается на уравнения газовой динамики зернистого слоя и гомогенную модель однокомпонентного двухфазного потока с учетом различия скоростей жидкой и паровой фаз, что позволяет получить аналитическое решение для массовой скорости смеси. При получении зависимостей для коэффициента скольжения фаз и показателя политропы для изохорического расширения смеси использованы методы многомерной нелинейной регрессии. Методы экспериментального исследования течения пароводяной смеси в неупорядоченной засыпке шаровых частиц использованы для получения опытных данных по величине массовой скорости. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Представлена газодинамическая модель движения пароводяного потока через неподвижный слой твердых частиц, в рамках которой получено аналитическое выражение для массовой скорости. С использованием теоретической модели выполнено обобщение имеющихся опытных данных по массовой скорости смеси в докритических и критических режимах течения. Показано, что переход к относительной величине массовой скорости позволяет построить универсальную расходную характеристику для произвольного зернистого слоя. **ВЫВОДЫ.** Разработанная математическая модель может быть использована для обобщения опытных данных и предсказания зависимости массовой скорости двухфазного парожидкостного потока в слое твердых частиц при докритических и критических режимах истечения.

Ключевые слова: зернистый слой, двухфазный поток, критическое и докритическое истечения.

Информация о статье. Дата поступления 15 июня 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Таиров Э.А., Таирова Е.В., Хан П.В. Газодинамическая модель критического и докритического истечения пароводяной смеси через слой шаровых частиц // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 162–172. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-162-172

GAS DYNAMICS MODEL OF CRITICAL AND SUBCRITICAL LIQUID-VAPOR MIXTURE FLOW THROUGH A BED OF SPHERICAL PARTICLES

E.A. Tairov, E.V. Tairova, P.V. Khan

¹Таиров Эмир Асгадович, доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории динамики парогенерирующих систем, e-mail: tairov@isem.irk.ru
Emir A. Tairov, Doctor of technical sciences, Chief Researcher of the Laboratory of Vapor Generation Systems Dynamics, e-mail: tairov@isem.irk.ru

²Таирова Елена Викторовна, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры математики, e-mail: tairova_L@mail.ru
Elena V. Tairova, Candidate of Physico-Mathematical sciences, Associate Professor of the Department of Mathematics, e-mail: tairova_L@mail.ru

³Хан Полина Вениаминовна, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамики парогенерирующих систем, e-mail: polinakhan@gmail.com
Polina V. Khan, Candidate of Physico-Mathematical sciences, Senior Researcher of the Laboratory of Vapor Generation Systems Dynamics, e-mail: polinakhan@gmail.com



Melentiev Energy System Research Institute SB RAS,
130, Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russian Federation
Irkutsk State Transport University,
15, Chernyshevsky St., Irkutsk, 664074, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to give a computational and experimental rationale for the theoretical model of two-phase liquid-vapor flow through a fixed layer of solid particles, compare the calculation results with the experimental data on subcritical and critical liquid-vapor flow through various beds of spherical particles and estimate the predictive capability of the model. **METHODS.** Theoretical description relies on the equations of gas dynamics of a granular layer and the homogeneous model of a one-component two-phase flow taking into account the difference in velocities of liquid and vapor phases, which allows to obtain an analytical solution for the mass velocity of the mixture. When obtaining the dependences for the phase slip ratio and the polytropic coefficient for isenthalpic expansion of the mixture multi-dimensional nonlinear regression methods are used. Methods of the experimental study of liquid-vapor flow in a random packed bed of spherical particles are used to obtain the experimental data on the mass velocity value. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The analytic expression for the mass velocity is obtained in the framework of the presented gas dynamics model of the liquid-vapor flow through the fixed layer of solid particles. The available experimental data on the mass velocity of critical and subcritical flow are generalized using the theoretical model. It is shown that the transition to the relative magnitude of the mass velocity allows to construct a universal flow characteristic for an arbitrary granular layer. **CONCLUSIONS.** The developed mathematical model can be used to generalize the experimental data and predict the dependence of the mass velocity of a two-phase liquid-vapor flow in a layer of solid particles under subcritical and critical flow regimes.

Keywords: granular layer, two-phase flow, critical and subcritical flows

Information about the article. Received June 15, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Tairov E.A., Tairova E.V., Khan P.V. Gas dynamics model of critical and subcritical liquid-vapor mixture flow through a bed of spherical particles. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 162–172. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-162-172 (In Russian)

Введение

Исследование движения двухфазного потока через пористые среды представляет интерес в таких областях техники, как создание химических каталитических реакторов, высокоэффективных теплообменников, реакторов с шаровыми микротвэлами; анализ безопасности ядерных реакторов; совершенствование технологии добычи нефти и газа. Одной из основных задач гидравлики и теплообмена является установление связи между расходом и перепадом давления. Большинство теоретических моделей движения двухфазного потока основано на обобщениях закона Дарси [1, 2] и двучленного уравнения Форхгеймера – Эргуна [3, 4], а также на уравнениях с условиями межфазного сопротивления [5–7]. Во всех случаях течение двухфазного потока рассматривается при массовых скоростях, не достигающих своих максимальных значений. Расчет максимальных расходов пароводяной смеси, при которых наблюдается запирание двухфазного потока, решается, как правило, в виде самостоятельной задачи. Основные результаты были получены в ходе теоретических и экспериментальных исследований критических двухфазных течений через длинные и короткие трубы, диафрагмы, сопла, вентили и предохранительные клапаны. Используемые при этом теоретические модели, которые различаются детальностью описания явления, представлены в обзорных работах [8–11]. Отмечено, что для не очень коротких каналов модели со скольжением фаз хорошо согласуются с экспериментом по величине критического расхода. Проблема сводится к выбору способа определения удельного объема смеси.

Вопросы газодинамического запирания потока в зернистых средах исследованы в монографии М.А. Гольдштика [12], где получено аналитическое выражение для максимального расхода идеального газа. В качестве условия достижения критического расхода рассмотрено истечение в вакуум. В работе [13] представлено обобщение модели Гольдштика на случай



двухфазного пароводяного потока, которая позволила успешно описать единственно имеющиеся экспериментальные данные по критическому истечению через неподвижные засыпки шаровых частиц [14].

Настоящая работа посвящена обобщению результатов, опубликованных в работе [13], с целью описания на основе единой теоретической модели докритического и критического режимов течения двухфазной парожидкостной смеси через плотноупакованный слой твердых частиц. Представлено сопоставление результатов теоретического расчета массовой скорости потока с опытными данными по выходу на критический режим истечения в атмосферу. Показывается, что введение безразмерной массовой скорости позволяет получить обобщенную зависимость для конкретного вида засыпки независимо от формы частиц и пористости зернистого слоя.

Математическая модель движения пароводяного потока

Для описания критического и докритического истечения пароводяной смеси через засыпку из неподвижных сферических частиц были использованы уравнения газовой динамики зернистого слоя [12]. Основные уравнения включают:

– уравнение движения:

$$\left[1 + \frac{4}{3}(1-m)\right] \rho w_m \frac{dw_m}{dy} = -\frac{dP}{dy} - \frac{3}{2} \frac{m(1-m)}{\psi d} \rho w_m^2, \quad (1)$$

где m – средняя пористость; w_m – среднеобъемная скорость пароводяной смеси в поровом пространстве; d – диаметр шаровой частицы; $\psi = 0,508 + 0,56(1-m)$ – относительное минимальное проходное сечение;

– уравнение неразрывности:

$$\rho w_m = \rho_1 w_{1,m}, \quad (2)$$

– уравнение политропы:

$$P / P_1 = (\rho / \rho_1)^n. \quad (3)$$

Интегрирование этих уравнений по высоте засыпки от 0 до H при допущении, что $d \ll H$, дает следующее выражение для массовой скорости:

$$\rho w_m = \left[\frac{2n}{3(n+1)} \frac{d}{H} \frac{\psi}{m(1-m)} P_1 \rho_1 \left(1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right) \right]^{0,5}. \quad (4)$$

Здесь P_1, ρ_1 – давление и плотность при $y = 0$; P_2 – давление при $y = H$. Максимальную скорость можно определить, приравняв P_2 к нулю [12]:

$$(\rho w_m)_{\max} = \left[\frac{2n}{3(n+1)} \frac{d}{H} \frac{\psi}{m(1-m)} P_1 \rho_1 \right]^{0,5}. \quad (5)$$

Следуя обобщению представленной модели на случай двухфазного потока [13] будем считать течение пароводяной смеси через шаровую засыпку изохлальным, а термодинамическое состояние смеси – подчиняющимся уравнению политропы, в котором температуры



фаз принимаются одинаковыми, но существует различие скоростей пара и жидкости. Паровая компонента движется быстрее жидкой, и отношение их скоростей, $s = w''_m / w'_m$, именуемое коэффициентом скольжения, существенно влияет на истинное объемное паросодержание:

$$\phi = \left[1 + s \frac{\rho''}{\rho'} \frac{1-x}{x} \right]^{-1}, \quad (6)$$

которое в свою очередь определяет плотность смеси:

$$\rho = \rho'(1-\phi) + \rho''\phi. \quad (7)$$

Показатель политропы n и коэффициент скольжения s , входящие в уравнения (3)–(6), были определены на основе аппроксимации экспериментальных данных, представленных в работе [13], в диапазоне входных давлений – от 0,6 до 1,2 МПа, входного массового расходного паросодержания x_1 – от 0,02 до 0,2, и массовой скорости – от 150 до 1200 кг/(м² с). Для них получены следующие соотношения:

$$n = 0,48 + 0,52(1 - \exp(-x_1/0,14)), \quad (8)$$

$$s = 1 + a_s(P) \exp \left(- \left(\frac{b_s(P)}{x} + c_s(P)x \right) \right), \quad (9)$$

$$a_s(P) = 7,33 - 8,27 P + 4,35 P^2,$$

$$b_s(P) = 0,0592 - 0,124 P + 0,0746 P^2,$$

$$c_s(P) = 2,71 - 1,90 P + 1,39 P^2.$$

Как следует из уравнения (8), показатель политропы не зависит от параметров засыпки и входного давления, а является функцией только входного паросодержания.

Результаты и их обсуждение

В данной работе модель, представленная уравнениями (3)–(9), была адаптирована для описания не только критических, но и докритических значений массовой скорости, полученных в серии экспериментов с засыпками из стальных шариков диаметром 2 и 4 мм и толщиной слоя 50, 100, 250, 355 мм [14, 15]. Давление на входе в слой составляло 0,6; 0,9 и 1,2 МПа, входное массовое паросодержание изменялось в пределах от 0,011 до 0,178. Обработано 54 режима с измерением зависимости массовой скорости от перепада давления на слое. Критическая массовая скорость достигалась путем постепенного понижения выходного давления до атмосферного при фиксированных значениях входного давления и входного массового паросодержания.

С уменьшением отношения выходного и входного давлений, $\beta = P_2 / P_1$, ниже критического (или иначе, росте перепада давления, $\Delta P = P_1 - P_2$ выше критического) массовая скорость принимает свое максимальное значение и теряет чувствительность к дальнейшему понижению давления P_2 за слоем.

Анализ экспериментов позволил выявить критическое отношение давлений



$\beta_{cr} = P_{2,cr} / P_1$. Установлено, что в зависимости от условий эксперимента величина β_{cr} может принимать различные значения в интервале от 0,15 до 0,36, при этом β_{cr} почти не зависит от параметров засыпки, а с увеличением P_1 и входного паросодержания x_1 наблюдается понижение β_{cr} . Наименьшее значение $\beta_{cr} = 0,15$ получено при $P_1 = 1,2$ МПа и $x_1 = 0,178$. Здесь же при меньших паросодержаниях, характеризуемых значениями $x_1 = 0,033-0,055$, получена оценка $\beta_{cr} = 0,25$. Понижающее действие x_1 на критическое отношение давлений было отмечено и в исследовании расходов высоковлажного пара через сопло Лаваля [16, 17]. В результате обработки имеющихся экспериментальных данных по выходу на режим критического истечения через засыпки была получена приближенная формула для β_{cr} :

$$\beta_{cr} = 0,145 P_1^{-0,822} x_1^{-0,0813} \quad (10)$$

Использование β_{cr} при определении критического режима является более физичным, чем предположение $\beta=0$, принятое для получения формулы (5), и приводит ее к следующему виду:

$$(\rho w_m)_{cr} = \left[\frac{2n}{3(n+1)} \frac{d}{H} \frac{\psi}{m(1-m)} P_1 \rho_1 \left(1 - \beta_{cr}^{\frac{n+1}{n}} \right) \right]^{0,5} \quad (11)$$

Обобщение результатов опытов с использованием формулы (11) позволяет уточнить замыкающие соотношения для показателя политропы и коэффициента скольжения:

$$n = 0,43 + 0,57(1 - \exp(-x_1/0,16)), \quad (12)$$

$$s = 1 + a_s(P_1) \exp \left(- \left(\frac{b_s(P_1)}{x_1} + \frac{c_s(P_1)}{1 - x_1} \right) \right), \quad (13)$$

$$a_s(P_1) = 16,0 + 39,5 P_1 - 42,4 P_1^2;$$

$$b_s(P_1) = 0,0175 - 0,0123 P_1 - 0,00249 P_1^2;$$

$$c_s(P_1) = -2,30 + 11,5 P_1 - 8,04 P_1^2.$$

Отметим, что формулы (12), (13) привязаны, как правило, к известным параметрам смеси на входе в слой и применимы в интервале $0,01 < x_1 < 0,20$; $0,6 \leq P_1 \leq 1,2$ МПа.

Полученные зависимости представлены на рис. 1. Значения коэффициента скольжения для $P_1 = 1,2$ МПа мало зависят от паросодержания, что согласуется с формулой, приведенной в работе [18] для течения пароводяной смеси в узких трубах и кольцевых каналах при давлении свыше 1 МПа:

$$s = (22,1 / P)^{0,38}, \quad (14)$$

где давление P дано в МПа.

Разработанная математическая модель была использована для обобщения результатов экспериментов по докритическому и критическому истечениям пароводяной смеси через

различные упаковки шаровых частиц. Характерные зависимости выхода на критический режим при уменьшении давления P_2 за слоем частиц представлены на рис. 2. Вместе с экспериментальными точками здесь приведены расчетные зависимости $\rho w_m(\Delta P)$, определяемые формулами: (4) – в докритическом режиме, (11) – в критическом режиме.

На рис. 2 пунктирной линией показаны соответствующие предсказаниям формулы (10) критические перепады давления – $\Delta P_{cr} = P_1(1 - \beta_{cr})$. Можно видеть, что теоретическая модель достаточно адекватно описывает исследуемую зависимость.

Более полная иллюстрация соответствия между результатами расчета и данными физического эксперимента в диапазоне массовых скоростей от 150 до 1200 кг/(м² с) представлена на рис. 3. Можно видеть, что теоретическая модель с достаточно высокой точностью обобщает опытные данные, полученные при разных значениях давления P_1 , диаметра частиц d и высоты слоя H как в докритическом, так и критическом режимах. Коэффициент детерминации модели R^2 составляет: для критической массовой скорости – 97%, для докритической массовой скорости – 98%.

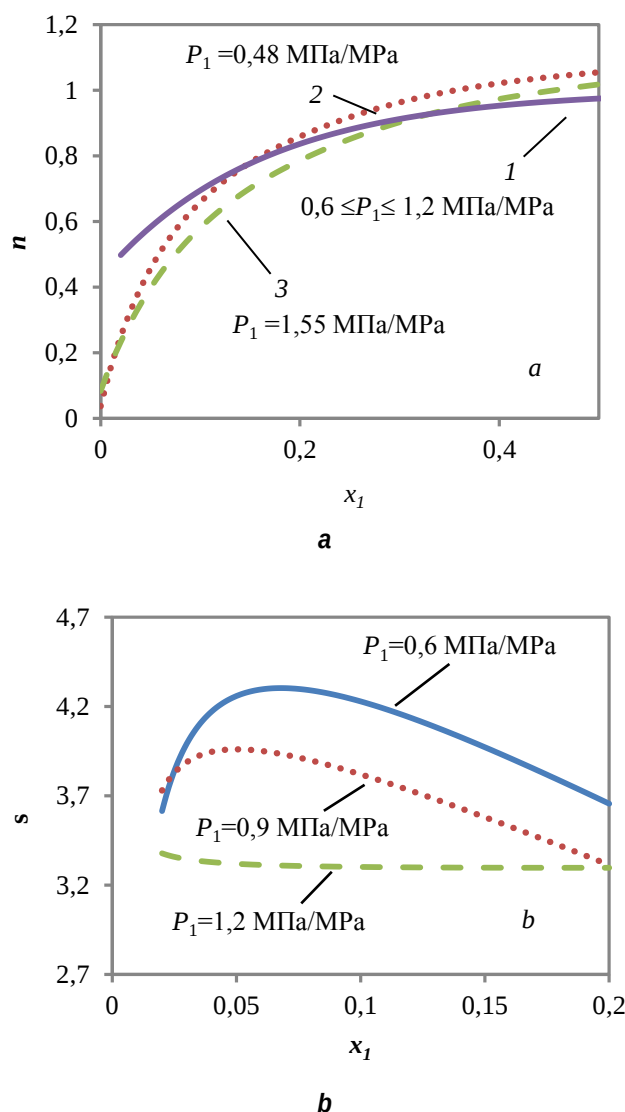


Рис. 1. Зависимость от паросодержания: а – показателей изоэнтальпии 1 (формула (12)) и изоэнтроп 2, 3 [19]; б – коэффициента скольжения (формула (13))

Fig. 1. Flow quality dependence: а – of the coefficients of isenthalpic process 1 (eq. (12)) and isentropic process 2, 3 [19]; б – of the slip ratio (eq. (13))

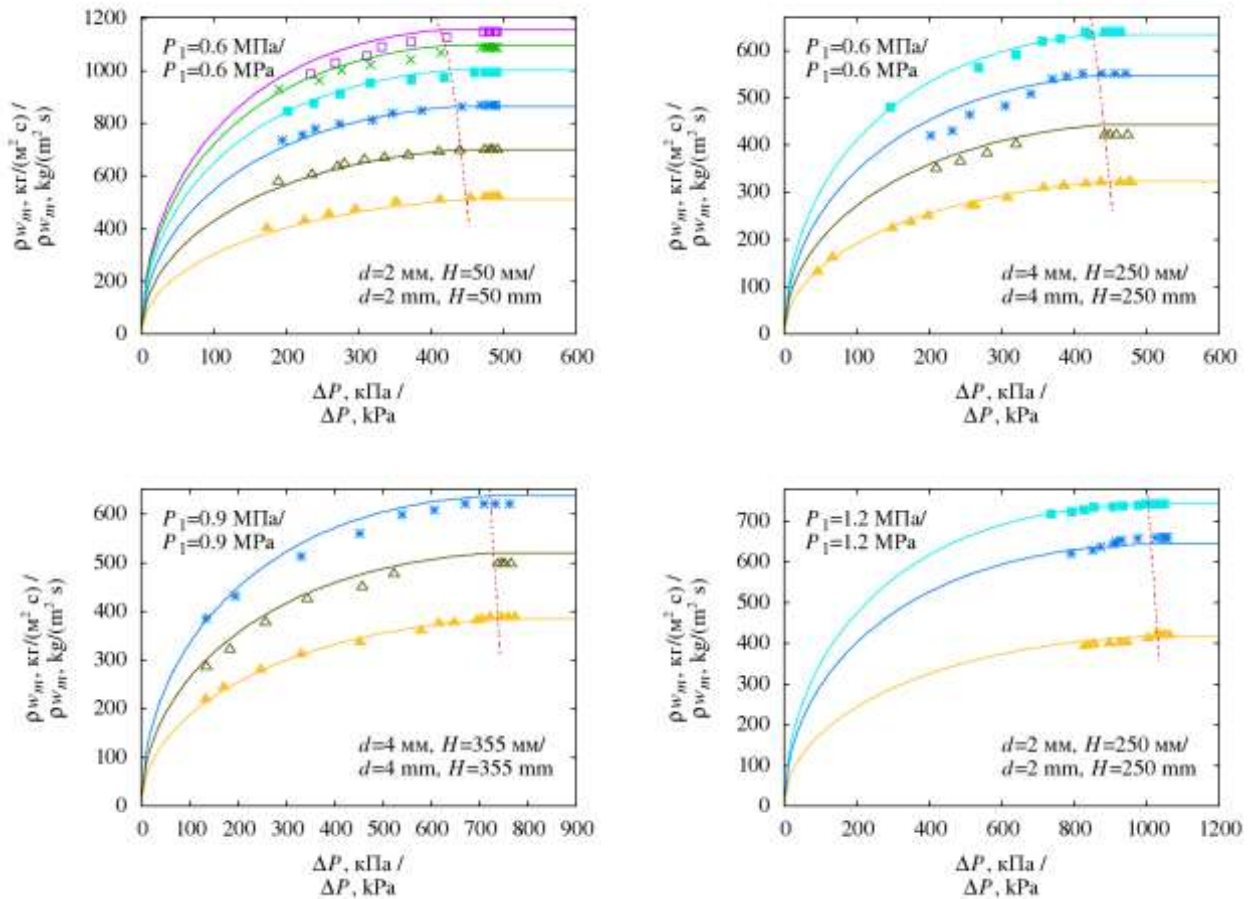


Рис. 2. Зависимость массовой скорости от перепада давления. Точки – эксперимент при массовом паросодержании x_1 : $\square$ – 0,016; $\times$ – 0,022; $\blacksquare$ – 0,033; $*$ – 0,055; $\triangle$ – 0,096; $\blacktriangle$ – 0,178.

Сплошная линия – расчет; пунктирная линия – граница критического режима
Fig. 2. Dependence of mass velocity on pressure drop. Dots stand for the experiment at the flow quality x_1 : $\square$ – 0.016; $\times$ – 0.022; $\blacksquare$ – 0.033; $*$ – 0.055; $\triangle$ – 0.096; $\blacktriangle$ – 0.178.

The solid line stands for calculation; dashed line shows the boundary of the critical regime

Введем относительную безразмерную скорость через отношение левых частей выражений (4) и (11):

$$PW_m = \frac{\rho w_m}{(\rho w_m)_{cr}}. \quad (15)$$

Согласно правым частям формул (4), (11), для любых засыпок неподвижных твердых частиц, характеризующихся одинаковыми значениями d/H , пористости m , при равных условиях на входе – P_1 , ρ_1 , равносильных заданию пары P_1 , x_1 , выражение (15) зависит только от трех параметров:

$$PW_m = \left(\frac{1 - \beta^{\frac{n+1}{n}}}{1 - \beta_{cr}^{\frac{n+1}{n}}} \right)^{0,5}. \quad (16)$$



Причем n и β_{cr} при фиксированном давлении P_1 на входе в слой являются функциями только входного паросодержания смеси. В этом случае формула (16) может быть использована для обобщения данных по массовой скорости, полученных для разных видов засыпок при равных паросодержаниях x_1 . Обобщение результатов экспериментов для всех засыпок и некоторых значений входного массового паросодержания и давления показано на рис. 4. Левый край линий ограничивается соответствующим значением β_{cr} .

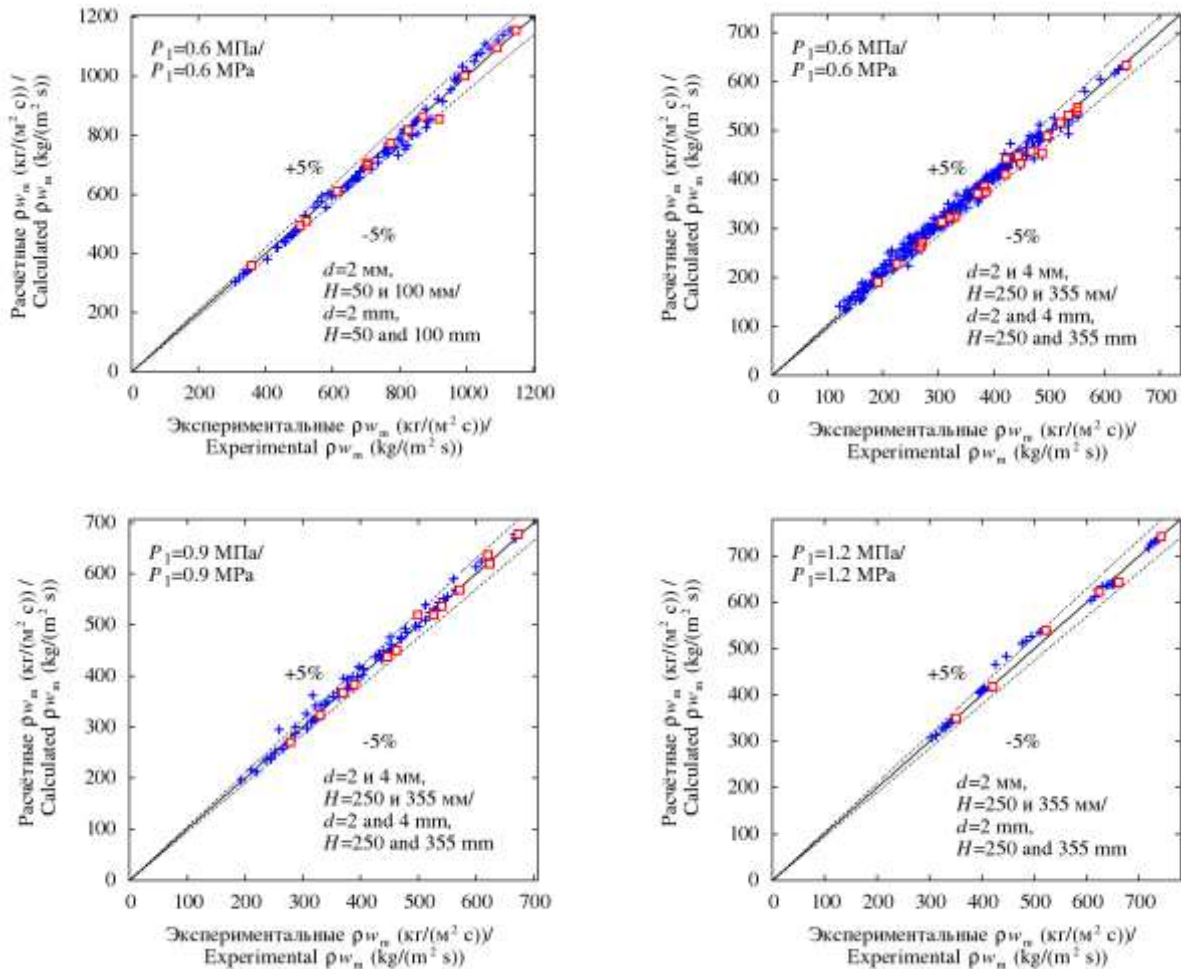


Рис. 3. Расчётные и экспериментальные значения массовой скорости:

+ – докритические значения, □ – критические

Fig. 3. Calculated and experimental values of mass velocity:

+ – subcritical values, □ – critical values

Формула (16) может быть полезной при экспериментальном исследовании двухфазных течений в зернистых средах со сложной внутренней структурой, для которой трудно указать однозначно ее пористость и определяющий диаметр зерен. Представив ее в следующем виде:

$$\rho w_m = (\rho w_m)_{cr} \frac{\left(1 - \beta^{\frac{n+1}{n}}\right)^{0.5}}{\left(1 - \beta_{cr}^{\frac{n+1}{n}}\right)^{0.5}}, \quad (17)$$

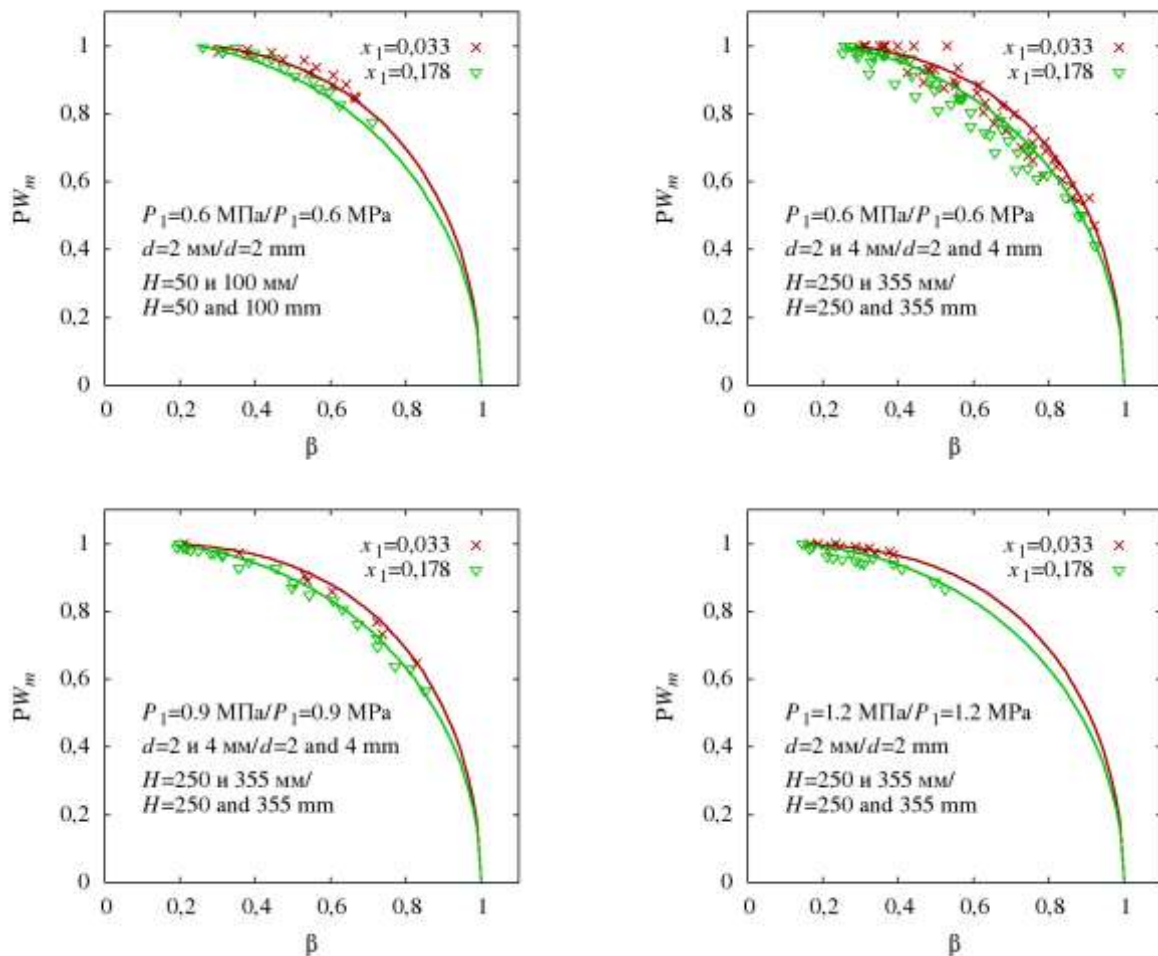


Рис. 4. Относительная массовая скорость: точки – эксперимент, линии – расчет
Fig. 4. Dimensionless mass velocity: dots stand for the experiment, lines – for calculation

можно по критическим параметрам истечения восстановить зависимость $\rho w_m(\Delta P)$ в докритической области. И, наоборот, по результатам измерений в докритической области можно получить грубую оценку величины максимальной массовой скорости. Как было установлено в экспериментах, критическое отношение давлений существенно меньше единицы, особенно оно уменьшается при повышении входного давления P_1 . Показатель политропы также меньше единицы. Это приводит к весьма малому значению $\beta_{cr}^{(n+1)/n} \ll 1$. Пренебрегая малой величиной в уравнении (17), получаем:

$$(\rho w_m)_{\max} = \frac{\rho w_m}{\left(1 - \beta^{\frac{n+1}{n}}\right)^{0.5}}. \quad (18)$$

Расчет по приближенной формуле (18) дает значение $(\rho w_m)_{\max}$ всего на 0,3–2,3% выше, чем по формуле (11).

Располагая несколькими замерами $\rho w_m(\Delta P)$, можно с помощью формулы (17) исключить параметры критического режима и построить всю кривую для массовой скорости в докритической области.



Заключение

Разработана математическая модель истечения двухфазной парожидкостной смеси через неупорядоченный слой твердых частиц. Она представляет расширение теоретической модели, рассмотренной М.А. Гольдштиком при описании течения идеального газа, на случай двухфазного потока. Расчет средней плотности смеси ведется с учетом скольжения фаз. При определении параметра скольжения и показателя политропы использованы опытные данные. С помощью разработанной модели с достаточно высокой точностью обобщены результаты экспериментов по критическому и докритическому режимам истечения пароводяной смеси через различные слои шаровых частиц. Показана возможность применения предложенного подхода для обобщения опытных данных по истечению через зернистые слои со сложной внутренней структурой.

Работа выполнена в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН на ЦКП «Высокотемпературный контур» в рамках научного проекта III.17.1.3 программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № АААА-А17-117030310443-5, при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 17-08-00709).

Библиографический список

1. Stubos A., Buchlin J.-M. Analysis and numerical simulation of the thermohydraulic behaviour of a heat dissipating debris bed during power transients // Int. J. Heat Mass Transfer. 1993. Vol. 36. No. 5. P. 1391–1401.
2. Авдеев А.А., Созиов Р.И. Гидродинамическое сопротивление потока пароводяной смеси в шаровой засыпке // Теплофизика высоких температур. 2008. Т. 46. № 2. С. 251–256. DOI: 10.1134/s10740-008-2011-0
3. Li L., Zou X., Lou J., Li H., Lei X. Pressure drops of single/two-phase flows through porous beds with multi-sizes spheres and sands particles // Annals of Nuclear Energy. 2015. Vol. 85. P. 290–295.
4. Tung V., Dhir V. A hydrodynamic model for two-phase flow through porous media // Int. J. Multiphase Flow. 1988. Vol. 14. No. 1. P. 47–65.
5. Li L., Wang H., Zou X., Kong L. Flow resistances characteristics in a particulate bed with the configurations of uniform mixture and stratification // Annals of Nuclear Energy. 2018. Vol. 112. P. 62–70.
6. Сорокин В.В. Расчет двухфазного адиабатического течения в шаровой засыпке // Теплофизика высоких температур. 2007. Т. 45. № 2. С. 261–266. DOI: 10.1134/S0018151X07020137
7. Taherzadeh M., Saidi M.S. Modeling of two-phase flow in porous media with heat generation // International Journal of Multiphase Flow. 2015. Vol. 69. P. 115–127.
8. Делайе Дж., Гио М., Ритмюллер М. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков в атомной и тепловой энергетике / пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 422 с.
9. Kim S.-M., Mudawar I. Review of two-phase critical flow models and investigation of the relationship between choking, premature CHF, and CHF in micro-channel heat sinks // Int. J. of Heat and Mass Trans. 2015. Vol. 87. P. 497–511.
10. Eliasi E., Lellouche G.S. Two-phase critical flow // Int. J. Multiphase Flow. 1994. Vol. 20. P. 91–168.
11. Фисенко В.В. Критические двухфазные потоки. М.: Атомиздат, 1978. 160 с.
12. Гольдштик М.А. Процессы переноса в зернистом слое: монография. Новосибирск: Изд-во Института теплофизики СО РАН, 2005. 358 с.
13. Pokusaev B.G., Tairov E.A., Khan P.V., Khramtsov D.P. Numerical and Analytical Approaches to Modeling Critical Two-Phase Flow with Granular Layer // J. of Engineering Thermophysics. 2018. Vol. 27. P. 20–29.
14. Таиров Э.А., Покусаев Б.Г., Быкова С.М. Критическое истечение парожидкостного потока через слой шаровых частиц // Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54. № 2. С. 277–286. DOI: 10.1134/S0018151X16020218
15. Быкова С.М., Таиров Э.А. Влияние параметров засыпки на истечение пароводяной смеси // Вестник ИрГТУ. 2014. № 9 (92). С. 197–201.
16. Дейч М.Е., Данилин В.С., Циклаури Г.В., Шанин В.К. Исследование течения влажного пара в осесимметричных соплах Лаваля в широком диапазоне степеней влажности // Теплофизика высоких температур. 1969. Т. 7. Вып. 2. С. 327–333.
17. Starkman E.S., Schrock V.E., Neusen K.F., Maneely D.J. Expansion of a very low quality two-phase fluid through a convergent-divergent nozzle // J. Basic Eng. 1964. Vol. 86. P. 247–254.
18. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике / под общ. ред. П.Л. Кириллова: в 3 т. Т. 1. Теплогидравлические процессы в ЯЭУ / П.Л. Кириллов, В.П. Бобков, А.В. Жуков, Ю.С. Юрьев. М.: ИздАТ, 2010. 771 с.
19. Белоконов Н.И. Термодинамика. М., Л.: Государственное энергетическое издательство, 1954. 427 с.



References

1. Stubos A., Buchlin J.-M. Analysis and numerical simulation of the thermohydraulic behaviour of a heat dissipating debris bed during power transients. *Int. J. Heat Mass Transfer*. 1993, vol. 36, no. 5, pp. 1391–1401.
2. Avdeev A.A., Soziev R.I. Hydrodynamic drag of a flow of steam-water mixture in a pebble bed. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature]. 2008, vol. 46, no. 2, pp. 251–256. DOI: 10.1134/S10740-008-2011-0 (In Russian)
3. Li L., Zou X., Lou J., Li H., Lei X. Pressure drops of single/two-phase flows through porous beds with multi-sizes spheres and sands particles. *Annals of Nuclear Energy*. 2015, vol. 85, pp. 290–295.
4. Tung V., Dhir V. A hydrodynamic model for two-phase flow through porous media. *Int. J. Multiphase Flow*. 1988, vol. 14, no. 1, pp. 47–65.
5. Li L., Wang H., Zou X., Kong L. Flow resistances characteristics in a particulate bed with the configurations of uniform mixture and stratification. *Annals of Nuclear Energy*. 2018, vol. 112, pp. 62–70.
6. Sorokin V.V. Calculation of two-phase adiabatic flow in a pebble bed. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature]. 2007, vol. 45, no. 2, pp. 261–266. DOI: 10.1134/S0018151X07020137 (In Russian).
7. Taherzadeh M., Saidi M.S. Modeling of two-phase flow in porous media with heat generation. *International Journal of Multiphase Flow*. 2015, vol. 69, pp. 115–127.
8. Delhaye J.M., Giot M., Riethmuller M.L. Thermohydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering. Washington, Hemisphere Publishing Corporation, 1981, 525 p. (Russ. Ed.: Delaie Dzh., Gio M., Ritmyuller M. *Teploobmen i gidrodinamika dvukhfaznykh potokov v atomnoi i teplovoi energetike*. [Thermohydraulics of two-phase systems for industrial design and nuclear engineering]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984, 422 s.)
9. Kim S.-M., Mudawar I. Review of two-phase critical flow models and investigation of the relationship between choking, premature CHF, and CHF in micro-channel heat sinks. *Int. J. of Heat and Mass Trans.* 2015, vol. 87, pp. 497–511.
10. Eliasi E., Lellouche G.S. Two-phase critical flow. *Int. J. Multiphase Flow*. 1994, vol. 20, pp. 91–168.
11. Fisenko V.V. *Kriticheskie dvukhfaznye potoki* [Critical two-phase flows]. Moscow: Atomizdat Publ., 1978, 160 p. (In Russian)
12. Gol'dshtik M.A. *Protsessy perenosa v zernistom sloe* [Transport processes in a granular layer] Novosibirsk: Publishing House of the Institute of Thermophysics SB RAS, 2005, 358 p. (In Russian)
13. Pokusaev B.G., Tairov E.A., Khan P.V., Khramtsov D.P. Numerical and Analytical Approaches to Modeling Critical Two-Phase Flow with Granular Layer. *J. of Engineering Thermophysics*. 2018, vol. 27, pp. 20–29.
13. Pokusaev B.G., Tairov E.A., Khan P.V., Khramtsov D.P. Numerical and Analytical Approaches to Modeling Critical Two-Phase Flow with Granular Layer. *Journal of Engineering Thermophysics*. 2018, vol. 27, pp. 20–29.
14. Tairov E.A., Pokusaev B.G., Bykova S.M. Vapor–liquid critical flow through a layer of spherical particles. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature]. 2016, vol. 54, no. 2, pp. 277–286. DOI: 10.1134/S0018151X16020218 (In Russian)
15. Bykova S.M., Tairov E.A. Backfill parameter effect on effluent water-steam mixture. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2014, no. 9 (92), pp. 197–201. (In Russian)
16. Deich M.E., Danilin V.S., Tsiklauri G.V., Shanin V.K. Research of wet steam flow in axisymmetric Laval nozzles in a wide range of moisture levels. *Teplofizika vysokikh temperatur* [High Temperature]. 1969, vol. 7, issue 2, pp. 327–333. (In Russian)
17. Starkman E.S., Schrock V.E., Neusen K.F., Maneely D.J. Expansion of a very low quality two-phase fluid through a convergent-divergent nozzle. *J. Basic Eng.* 1964, vol. 86, pp. 247–254.
18. *Spravochnik po teplogidravlicheskim raschetam v yadernoi energetike* [Handbook on thermal and hydraulic calculations in nuclear power engineering] / under general edition of P.L. Kirillova: in 3 volumes. V. 1. *Teplogidravlicheskie protsessy v YaEU* [Thermo-hydraulic processes in nuclear power plants]. P.L. Kirillov, V.P. Bobkov, A.V. Zhukov, Yu.S. Yur'ev. Moscow: Izdat Publ., 2010, 771 p. (In Russian)
19. Belokon' N.I. *Termodinamika* [Thermodynamics]. Moscow, Leningrad: State Energy Publishing House, 1954, 427 p. (In Russian)

Критерии авторства

Таиров Э.А., Таирова Е.В., Хан П.В. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Tairov E.A., Tairova E.V., Khan P.V. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 669. 66.046.4:66.061.16

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-173-183>

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА РАВНОВЕСНЫЕ СОСТОЯНИЯ СИСТЕМЫ ПРИ ОБЖИГЕ ОТХОДОВ КОБАЛЬТОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

© М.О. Молдурушку¹, А.Ф. Чульдум², Л.Х. Тас-оол³

Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН,
667007, Российская Федерация, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Интернациональная, 117а.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Изучение влияния температуры на равновесные состояния системы при обжиге шихты шлам/ Na_2CO_3 . **МЕТОДЫ.** Скорость извлечения мышьяка и его выход определяли по изменению содержания мышьяка в исходных пробах шихты и кеках водного выщелачивания. Содержание мышьяка в пробах отвала и кеков определено рентгенофлуоресцентным методом. Исследование фазового состава отходов проведено на дифрактометре XRD-6000. Равновесный состав систем рассчитан в компьютерной программе HSC Chemistry 6.0. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** Изучено изменение скорости извлечения мышьяка из отходов кобальтового производства в процессе обжига шихты в интервале температур 600–900°C. Показано, что скорость извлечения мышьяка в виде растворимого продукта Na_3AsO_4 максимальна при температуре 700–740°C. Отмечено влияние температуры на равновесный состав системы, в которой Na_2CO_3 реагирует с десятью малорастворимыми арсенатами: $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$, AlAsO_4 , $\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$, FeAsO_4 . В исследованных условиях при температурах выше 600°C химическое равновесие реакций у всех перечисленных арсенатов, за исключением арсената железа (III), сдвинуто в направлении выхода Na_3AsO_4 , что обусловлено их эндотермическим тепловым эффектом ($\Delta H > 0$). Вместе с тем глубина сдвига равновесия с ростом температуры ослабевает вследствие уменьшения значений ΔH . В случае взаимодействия FeAsO_4 с Na_2CO_3 из-за выделения теплоты (реакция экзотермическая, $\Delta H < 0$) с ростом температуры усиливается сдвиг равновесия в направлении обратной реакции, т.е. расходования Na_3AsO_4 . **ВЫВОДЫ.** Фазовый состав шлама в отвалах ранее работавшего комбината «Тувакобальт» представлен кальцитом, доломитом, кварцем, силикатами и малорастворимыми арсенатами. Последние в процессах обжига шихты из шлама и соды (соотношение 1:1) превращаются в водорастворимый Na_3AsO_4 . Скорость извлечения мышьяка в виде арсената натрия возрастает в интервале температуры обжига 600–740°C. Наибольшая величина скорости извлечения мышьяка – 3,33 мг/мин, а максимальная степень его извлечения – 85% (со снижением содержания в шламе с ~4,0 до 0,7 масс. %), устанавливается при температуре 740°C.

Ключевые слова: мышьяксоодержащие отходы, обжиг шихты шлам/сода, кинетика процесса извлечения мышьяка, равновесный состав.

Информация о статье. Дата поступления 11 июля 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Молдурушку М.О., Чульдум А.Ф., Тас-оол Л.Х. Исследование влияния температуры на равновесные состояния системы при обжиге отходов кобальтового производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 173–183. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-173-183

STUDYING TEMPERATURE EFFECT ON SYSTEM EQUILIBRIUM STATES AT COBALT PRODUCTION WASTE ROASTING

M.O. Moldurushku, A.F. Chuldum, L.Kh. Tas-ool

¹Молдурушку Маргарита Очур-ооловна, научный сотрудник лаборатории материаловедения, e-mail: ritageotom@mail.ru

Margarita O. Moldurushku, Researcher of the Materials Science Laboratory, e-mail: ritageotom@mail.ru

²Чульдум Анатолий Федорович, научный сотрудник лаборатории математического моделирования, e-mail: tajkinol@gmail.com

Anatoliy F. Chuldum, Researcher of the Mathematical Modeling Laboratory, e-mail: tajkinol@gmail.com

³Тас-оол Любовь Хертековна, кандидат химических наук, заведующий химико-технологической лабораторией, e-mail: tasool51@mail.ru

Lyubov Kh. Tas-ool, Candidate of Chemistry, Head of the Chemical Technology Laboratory, e-mail: tasool51@mail.ru



Tuvinian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 117a, Internationalnaya St., Kyzyl, Tyva Republic, 667007, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the paper is to study the effect of temperature on the equilibrium states of the system under roasting of sludge/ Na_2CO_3 charge. **METHODS.** The arsenic recovery rate and its yield are determined by arsenic content variation in the initial samples of charge and aqueous leaching cakes. The content of arsenic in dump and cake samples is determined by the x-ray fluorescent method. The phase composition of waste is studied on the XRD-6000 diffractometer. The equilibrium composition of systems is calculated in the computer program HSC Chemistry 6.0. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** Having studied the variation rate of arsenic recovery from cobalt production waste under charge roasting within the temperature range of 600–900°C, it was shown that the rate of arsenic recovery (as a soluble product of Na_3AsO_4) is maximum at the temperature of 700–740°C. It has been found out that the temperature influences the equilibrium composition of the system where Na_2CO_3 reacts with ten low soluble arsenates $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$, AlAsO_4 , $\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Pb}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Zn}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$, FeAsO_4 . The chemical equilibriums of reactions of all listed arsenates excluding iron (III) arsenate are shifted towards the Na_3AsO_4 yield in the researched conditions at the temperatures above 600°C. This is due to their endothermic thermal effects ($\Delta H > 0$). At the same time, as the temperature grows the depth of the equilibrium shifts weakens due to the decrease in their ΔH values. In the case of FeAsO_4 and Na_2CO_3 interaction the equilibrium shift increases in the direction of the reverse reaction, i.e. consumption of Na_3AsO_4 due to the release of heat (exothermic reaction, $\Delta H < 0$) as the temperature grows. **CONCLUSIONS.** The phase composition of sludge in the waste dumps of recently not operating plant “Tuvacobalt” is represented by calcite, dolomite, quartz, silicates and low soluble arsenates. The latter are transformed into water-soluble Na_3AsO_4 in the process of sludge and soda charge (ratio 1:1) roasting. The rate of arsenic recovery in the form of sodium arsenate increases in the roasting temperature range of 600–740°C. The highest value of the arsenic recovery of 3.33 mg/min, and its maximum recovery degree of 85% (if its content in the charge decreases from ~ 4.0 to 0.7wt %) is detected at the temperatures of 700–740°C.

Keywords: arsenic-containing wastes, sludge/soda charge roasting, kinetics of arsenic recovery, equilibrium composition

Information about the article. Received July 11, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Moldurushku M.O., Chuldum A.F., Tas-ool L.H. Studying temperature effect on system equilibrium states at cobalt production waste roasting. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 173–183. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-173-183 (In Russian)

Введение

Переработка токсичных мышьяксо-держащих отходов металлургической отрасли, загрязняющих почвы, грунтовые и подземные воды, является одной из важных технологических задач, направленных, прежде всего, на решение экологических проблем, заявивших о себе еще в 60-е гг. XX века [1–4]. Поиску способов обезвреживания мышьяковых отвалов путем перевода подвижных соединений мышьяка в стабильные формы, пригодные к их длительному хранению, посвящено немало исследований [1, 5–8].

В Республике Тыва в период 1971–1991 гг. на комбинате «Тувакобальт» осуществлялась переработка арсенидных никель-кобальтовых руд Хову-Аксынского месторождения по аммиачно-автоклавной технологии; основные рудные минералы –

арсениды: шмальтин-хлорантит – $(\text{Co}, \text{Ni})\text{As}_{2-3}$, скуттерудит – CoAs_2 , никелин – NiAs , саффлорит $(\text{CoFe})\text{As}_2$; окисленные минералы представлены эритрином – $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, и аннабергитом – $\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. На комбинате получали медно-никель-кобальтовый концентрат. За двадцатилетний период освоения месторождения в отвалы было складировано более 1,5 млн т отходов, состоящих из смеси хвостов аммиачно-автоклавного выщелачивания никель-кобальтовых руд и кеков магнетиальной очистки от мышьяка.

В настоящее время рассмотрение и обсуждение проблемы возрождения уникального кобальтового производства на базе Хову-Аксынского арсенидного кобальтового месторождения не обходится без анализа возможностей переработки мышь-



яксодержащих отходов, подвергающихся ветровой и водной эрозии. Отходы ранее работавшего комбината становятся объектом исследований, посвященных не только извлечению и утилизации токсичного мышьяка, но и комплексному использованию отвала в качестве техногенного сырья для производства металлов [9].

В работе [10] представлены результаты исследований, посвященных извлечению токсичного мышьяка из хвостохрани-

лищ комбината с использованием технологии спекания отходов с содой и последующего их водного выщелачивания. Технологические параметры процессов комбинированной переработки отходов по предложенной схеме обжига опубликованы в работах [11, 12].

Целью данной работы явилось изучение влияния температуры на равновесные состояния системы при обжиге шихты шлам/ Na_2CO_3 .

Материал и методы исследования

Объект исследований – отходы комбината «Тувакобальт», содержание мышьяка в отходах ~4 масс. %. Пробоподготовка предусматривала приготовление шихты шлам/ Na_2CO_3 в соотношениях 1:1, компоненты шихты измельчали до порошкообразного состояния (фракция менее 70 мкм) и тщательно перемешивали. Обжиг шихты проводили в интервале температур 600–840°C и продолжительности выдержки 1,5 ч. При каждой температуре проведено не менее двух опытов. Продукт обжига (огарок) подвергали водному выщелачиванию при температуре 80°C (соотношение огарок/вода – 1:10, продолжительность – 1 ч). Из пульпы выщелачивания кек отделяли механически, в кеке определяли остаточное содержание мышьяка. Степень извлечения мышьяка (превращения нерастворимых арсенатов в растворимый арсенат натрия Na_3AsO_4) рассчитывали по формуле:

$$Y = \frac{(C_{\text{и}} - C_{\text{к}})}{C_{\text{и}}} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где $C_{\text{и}}$ – количество мышьяка в исходном материале, мг; $C_{\text{к}}$ – количество мышьяка в кеке выщелачивания, мг.

Среднюю скорость извлечения мышьяка в Na_3AsO_4 определяли по формуле

$$V = \frac{C_{\text{и}} - C_{\text{к}}}{\tau}, \quad (2)$$

где τ – продолжительность обжига, ч.

Содержание мышьяка в пробах отвала и кеках выщелачивания анализировали на рентгенофлуоресцентном энергодисперсионном спектрометре S2 Ranger (Германия). Исследование фазового состава отходов проведено на дифрактометре XRD-6000. Для сравнительного анализа равновесных распределений реакционных арсенатов металлов использованы результаты расчетов компьютерной программы HSC Chemistry 6.0 [13].

Результаты и их обсуждение

По результатам рентгенофлуоресцентного анализа пробы шлама отвала имеют преимущественно карбонатно-силикатный состав, масс. %: CaO – 33,2; SiO_2 – 32,7; Fe_2O_3 – 13,2; Al_2O_3 – 6,4; As_2O_3 – 5,8; MgO – 4; SO_3 – 1,4; TiO_2 – 1; Na_2O – 0,97; MnO – 0,29; ZnO – 0,18. Согласно спектрам рентгенофазового анализа, в пробах присутствуют: кальцит, доломит, кварц, силикаты и арсенатные минералы, в их числе: эритрин – $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$; аннабергит – $\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$; скородит –

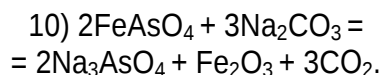
$\text{FeAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; симплезит – $\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$; гернезит – $\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$; четырехводный арсенат кальция – $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$; миметит – $\text{Pb}_5(\text{AsO}_4)_3\text{Cl}$. В составе огарка присутствует также гидрат арсената алюминия – $\text{AlAsO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. В работе [14] установлено, что в образце шлама основной мышьяксодержащей фазой является парасимплезит ($\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) – полиморфный аналог симплезита. По результатам термодинамического моделирования в отходах возможно образование леграндита –



$Zn_3(AsO_4)_2 \cdot 2,5H_2O$, и хлоротила – $Cu_3(AsO_4)_2 \cdot 6H_2O$ [2].

При обжиге шихты шлам/ Na_2CO_3 все его труднорастворимые арсенаты взаимодействуют с карбонатом натрия с образованием растворимого Na_3AsO_4 согласно схемам топохимических реакций:

- 1) $Ca_3(AsO_4)_2 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + 3CaO + 3CO_2$;
- 2) $AlAsO_4 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + Al_2O_3 + 3CO_2$;
- 3) $Mg_3(AsO_4)_2 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + 3MgO + 3CO_2$;
- 4) $Ni_3(AsO_4)_2 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + 3NiO + 3CO_2$;
- 5) $Co_3(AsO_4)_2 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + 3CoO + 3CO_2$;
- 6) $Fe_3(AsO_4)_2 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + Fe_3O_4 + 2CO_2 + CO$;
- 7) $Pb_3(AsO_4)_2 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + 3PbO + 3CO_2$;
- 8) $Zn_3(AsO_4)_2 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + 3ZnO + 3CO_2$;
- 9) $Cu_3(AsO_4)_2 + 3Na_2CO_3 = 2Na_3AsO_4 + 3CuO + 3CO_2$;



В табл. 1 приведены средние значения степени извлечения As из шихты шлам: $Na_2CO_3 = 1:1$ (в течение 1,5 ч) при протекании реакций 1–10 в интервале температур 600–840°C. Как видно, максимальная степень ($Y=85\%$) и максимальная скорость ($V=3,33$ мг/мин) извлечения мышьяка в виде растворимого Na_3AsO_4 достигается при температуре 740°C. При дальнейшем повышении температуры обжига степень извлечения As снижается до 2,55 мг/мин (при 840°C).

Статистическая обработка полученных данных методом наименьших квадратов позволяет описать температурную зависимость средней общей скорости десяти топохимических реакций уравнением

$$V = -5 \cdot 10^{-6} T^2 + 0,0069 T - 1,9718. \quad (3)$$

Графическое представление уравнения (3) показано на рис. 1. В реакционной системе, согласно полученной закономерности, скорость извлечения мышьяка из нерастворимых арсенатов в растворимый Na_3AsO_4 возрастает при температурах от 600 до 740°C и замедляется в интервале 740–850°C.

Таблица 1

Степень извлечения As из отходов комбината «Тувакобальт» при различных температурах обжига шихты

Table 1

Degree of As recovery from “Tuvakobalt” combine waste at various temperatures of charge roasting

T, °C	Содержание As			Степень извлечения As, %	Скорость извлечения As, мг/мин
	в отходах, мг	в кеке выщелачивания			
		мг	масс. %		
600	354	84,5	1,13	76	2,99
640	354	77,6	1,03	78	3,07
740	354	53,9	0,71	85	3,33
800	354	109,2	1,36	69	2,76
840	354	124,8	1,56	65	2,55

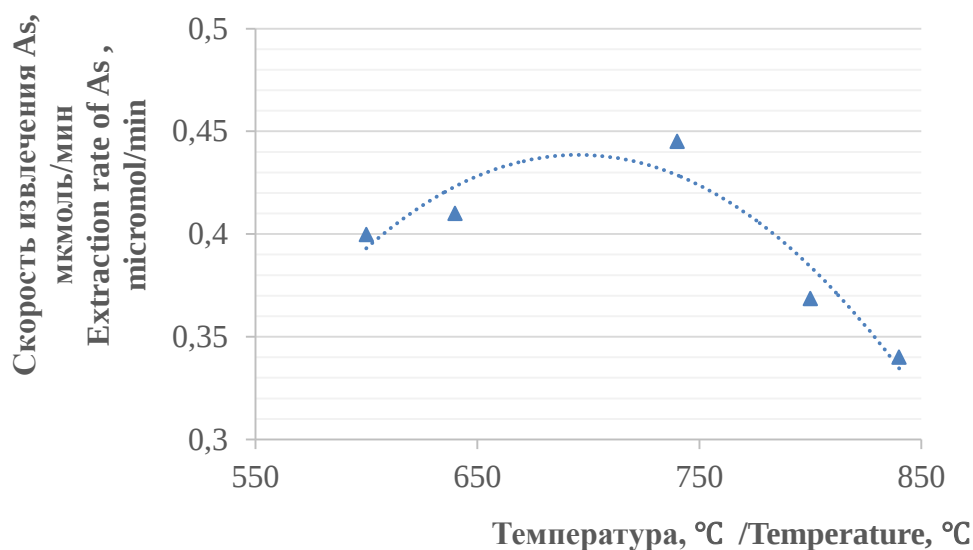


Рис. 1. Зависимость скорости извлечения мышьяка от температуры
Fig. 1. Temperature dependence of arsenic recovery rate

Химическая термодинамика позволяет провести расчеты равновесных составов исследуемой реакционной системы без проведения опытов по изучению равновесий. Константы равновесия химических реакций 1–10 при заданной температуре определены в программе HSC Chemistry 6.0 по уравнению изотермы реакции с использованием расчетных величин энергии

Гиббса реакций ΔG_T :

$$\ln K_p = -\frac{\Delta G}{RT}. \quad (4)$$

Изменение константы химического равновесия (K_p) реакций 1–10 в интервале температур 873–1173 К показано на рис. 2.

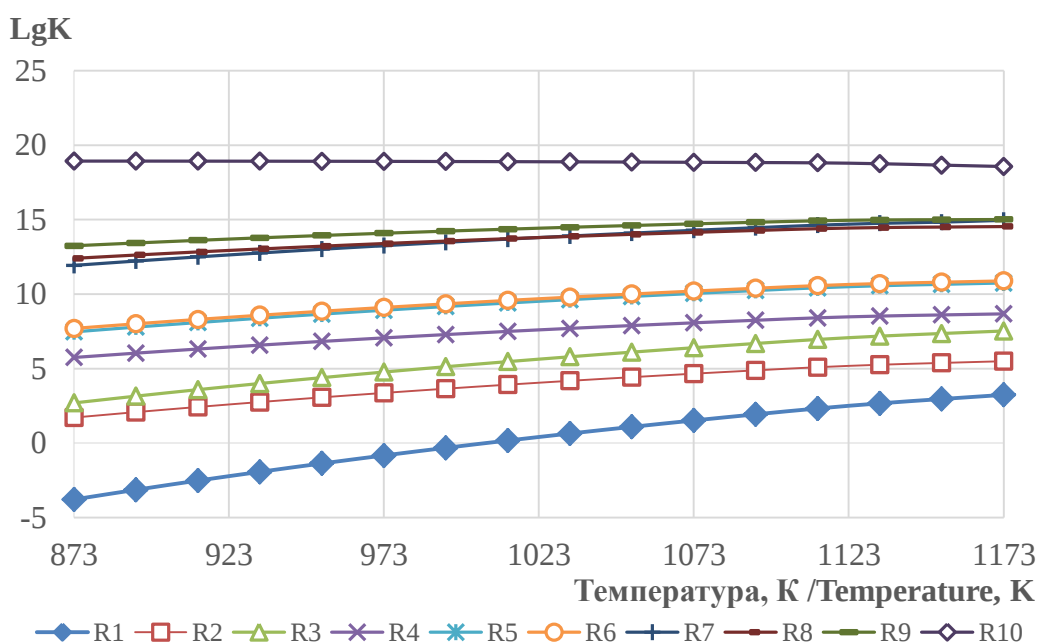


Рис. 2. Зависимость константы равновесия реакций 1–10 от температуры
Fig. 2. Temperature dependence of the equilibrium constant of reactions 1–10



Как видно из графиков, представленных на рис. 2, при повышении температуры обжига константа равновесия реакций 1–9 увеличивается, у реакции 10 – слабо убывает. Отмеченные отличия обусловлены влиянием теплового эффекта в соответствии с уравнениями изобары $d\ln K_p/dT = \Delta H/RT^2$.

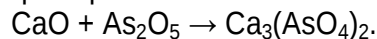
Расчетные величины тепловых эффектов реакций 1–10 в интервале 873–1173 К (600–900°C) приведены в табл. 2.

В соответствии с данными табл. 2 в интервале температур 873–1173 К (600–900°C) процессы взаимодействия с карбонатом натрия всех арсенатов, за исключением только арсената железа (III) (реакция 10), являются эндотермическими ($\Delta H > 0$). С ростом температуры смещение равновесий у обратимых реакций 1–9 в направлении эндотермических процессов (увеличения выхода растворимого Na_3AsO_4) начинает ослабевать, что связано со снижением воздействия температурного фактора в виде убыли ΔH реакций. А в случае взаимодействия арсената железа (III) с карбонатом натрия (реакция 10) с ростом температуры усиливается сдвиг равновесия в направлении обратной реакции (расходования Na_3AsO_4).

Для изучения изменений в распределении компонентов системы проведены расчеты равновесных составов ее арсенатной, оксидной и минеральных фаз при различных температурах обжига шихты. На рис. 3 представлена диаграмма равновесного распределения компонентов в арсенатной фазе.

Заметно, что в интервале температур 600–900°C в составе малорастворимых арсенатов преобладает AlAsO_4 , далее в порядке уменьшения содержания следуют $\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$. На диаграмме равновесное содержание арсенатов свинца, железа (III), цинка, меди не отображены ввиду их малых количеств: в интервале температур 600–900°C их количество увеличивается и соответственно составляет, кмоль: $1,0 \cdot 10^{-5}$ – $1,7 \cdot 10^{-5}$; $1,8 \cdot 10^{-8}$ – $3,0 \cdot 10^{-4}$; $3,4 \cdot 10^{-7}$ – $4,5 \cdot 10^{-5}$; $3,4 \cdot 10^{-7}$ – $4,5 \cdot 10^{-5}$.

Из графиков, представленных на рис. 3, видно, что равновесное содержание растворимого продукта Na_3AsO_4 , увеличиваясь в интервале 300–600°C до максимального значения, сохраняется неизменным при дальнейшем росте температуры. Содержание $\text{Mg}_3(\text{AsO}_4)_2$ убывает в интервале температур 400–900°C вследствие протекания реакции взаимодействия арсената магния с карбонатом натрия; возможно также разложение арсената магния на оксиды магния и мышьяка. Характер изменения равновесного содержания реагента $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ иной, с ростом температуры обжига его содержание возрастает до максимального (1,7 кмоль) к 600°C. Это может свидетельствовать о протекании в системе реакций, в которых образуется арсенат кальция, например:



Оксиды кальция и мышьяка присутствуют в составе отходов согласно данным рентгенофлуоресцентного анализа. В соответствии с данными, представленными в работе [14], арсенат кальция может образоваться при взаимодействии арсената железа (II) с кальцитом. Уменьшение равновесного содержания $\text{Fe}_3(\text{AsO}_4)_2$ при температуре 360–630°C связано с его разложением на арсенат кальция, оксиды Fe_2O_3 , Fe_3O_4 . При температуре от 750°C до 900°C содержание арсената железа (II) возрастает вследствие протекания обратной реакции.

Равновесное содержание $\text{Ni}_3(\text{AsO}_4)_2$, $\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$ при температуре обжига 300–550°C убывает вследствие их взаимодействия с карбонатом натрия. Содержание арсената никеля начинает возрастать при температуре выше 550°C, что, по всей видимости, связано с вкладом обратной реакции 4. Равновесное содержание арсената кобальта в системе снижается по мере увеличения температуры процесса. Карбонат натрия расходуется практически полностью (согласно стехиометрии реакций) при температуре не выше 600°C.

На рис. 4 представлена диаграмма равновесного распределения оксидов в процессе обжига отходов.



Таблица 2

Тепловые эффекты реакций при взаимодействии арсенатов
с карбонатом натрия, ΔH (кДж)

Table 2

Thermal effects of reactions under arsenates and sodium carbonate interaction, ΔH (kJ)

T, K (°C)	Реакция									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
873 (600)	484	273	341	218	241	231	218	166	141	-0,15
913 (640)	481	269	338	215	237	229	216	162	138	-2,7
973 (700)	475	264	332	208	231	225	211	156	132	-6,7
1013 (740)	471	259	327	203	226	221	207	151	127	-11
1073 (800)	464	251	320	195	219	214	200	143	119	-19
1113 (840)	458	246	314	189	213	208	196	137	114	-24
1133 (860)	366	154	222	97	121	116	104	45	22	-116
1173 (900)	361	148	217	91	115	111	177	40	17	-121

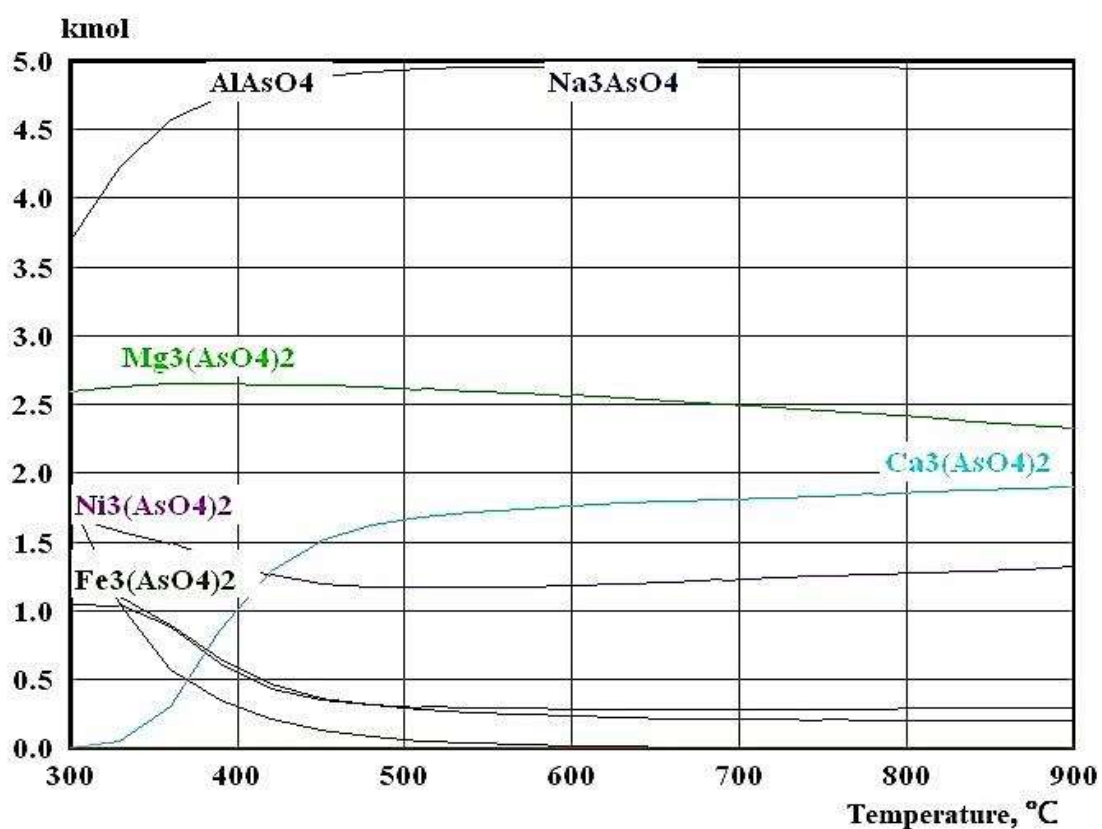


Рис. 3. Диаграмма равновесного распределения компонентов обжига отходов в арсенатной фазе
Fig. 3. Graph of equilibrium distribution of waste roasting components in the arsenate phase

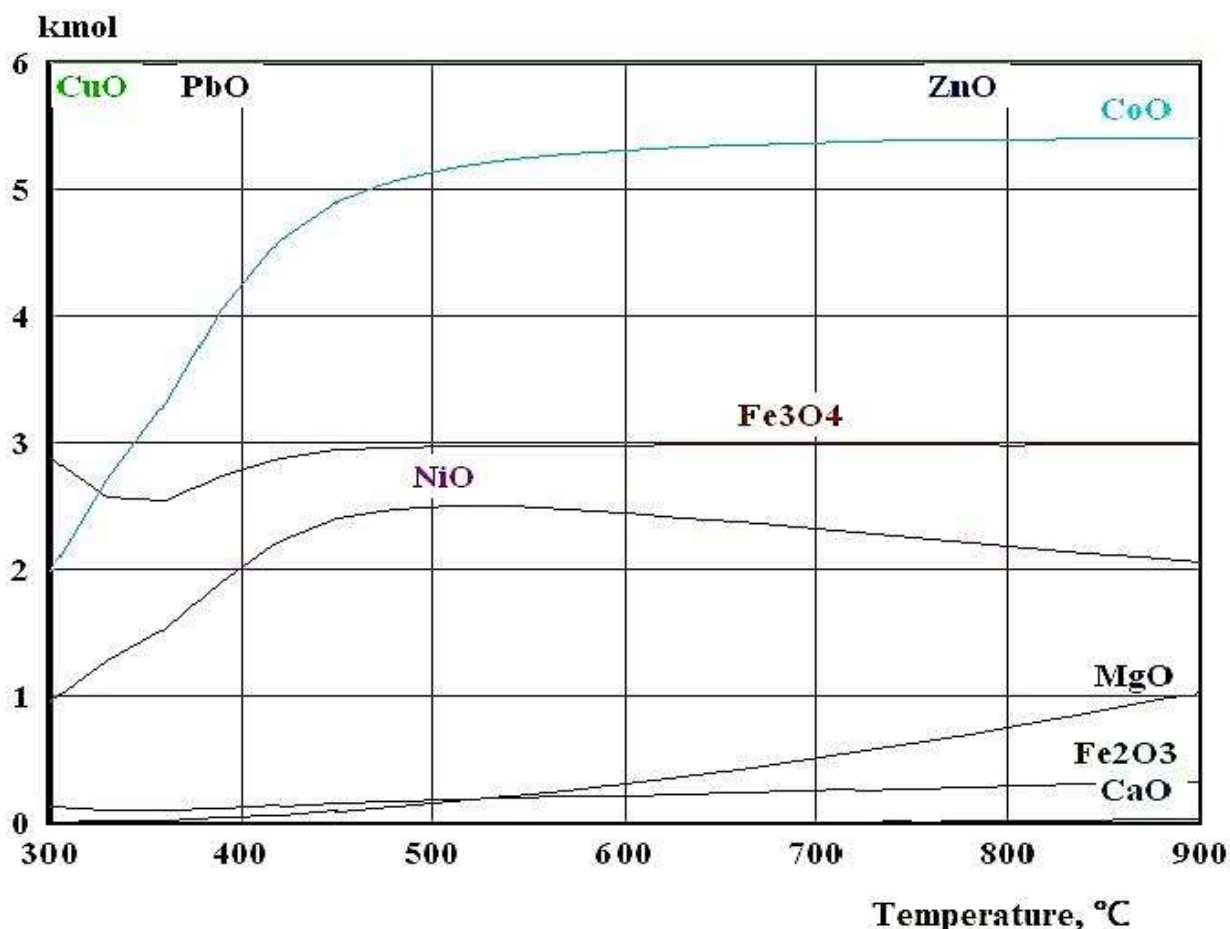


Рис. 4. Диаграмма равновесного распределения компонентов обжига отходов в оксидной фазе
Fig. 4. Graph of equilibrium distribution of waste roasting components in the oxide phase

Из рис. 4 видно, что до температуры порядка 550–600°C в системе происходит накопление NiO, CoO, Fe₃O₄. При температуре выше 600°C содержание оксида никеля убывает в результате протекания обратной реакции с образованием арсената никеля. Равновесное содержание оксида магния растет по мере увеличения температуры обжига.

Содержание оксидов меди, свинца, цинка достигает предельного значения и остается постоянным до 900°C. Незначительное увеличение содержания оксида кальция в интервале температуры от 840 до 1000°C связано, возможно, с протеканием реакции разложения карбонатов.

На рис. 5 представлена диаграмма равновесного распределения карбонатов (кальцита, доломита), силикатов (андрадита) и кварца в процессе обжига отходов. Как видно, в процессе обжига отходов в системе возможно появление силикатов щелочных и щелочноземельных металлов. Уменьшение количества кальцита (CaCO₃), вероятно, не связано с его термическим разложением (температура разложения 910°C) и может быть объяснено его взаимодействием с оксидами кремния и железа. При температуре выше 600°C количество андрадита Ca₃Fe₂(SiO₄)₃ начинает уменьшаться, SiO₂ – возрастать.

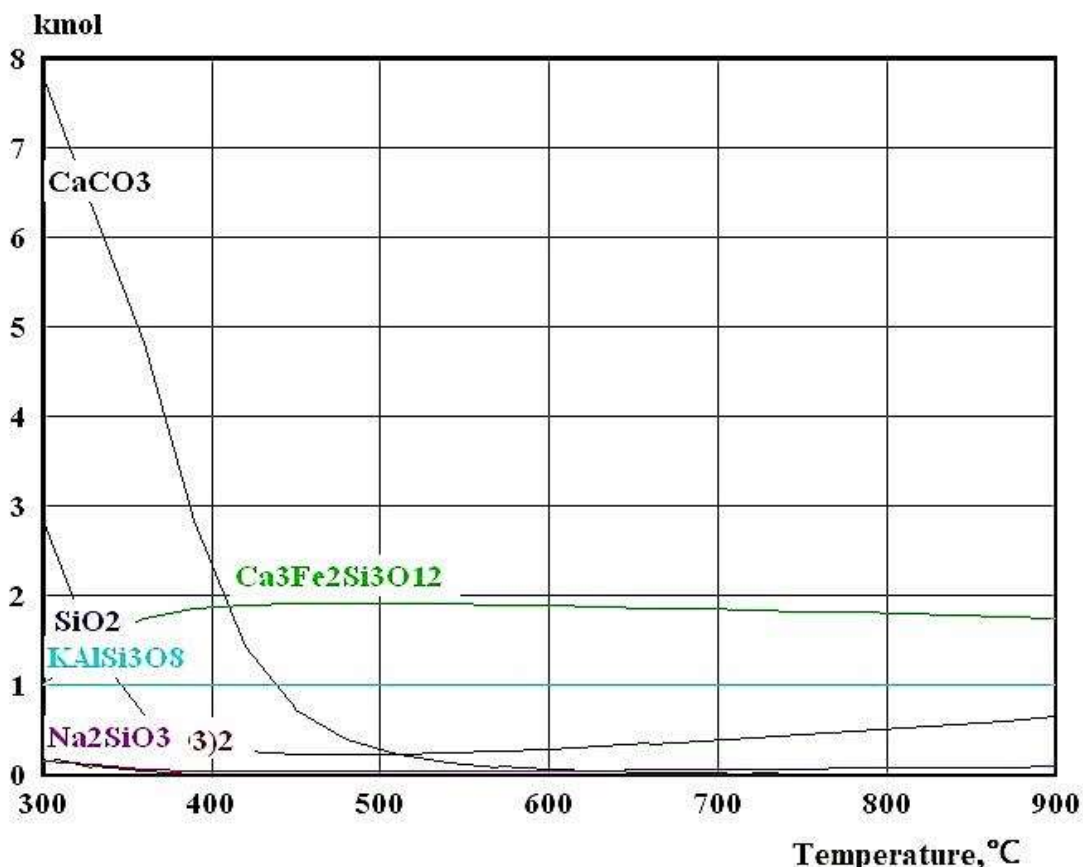


Рис. 5. Изменение равновесных количеств карбонатов, кварца, силикатов при обжиге отходов с карбонатом натрия в зависимости от температуры обжига
Fig. 5. Firing temperature dependent variation of equilibrium quantities of carbonates, quartz and silicates under roasting of waste with sodium carbonate

Выводы

Фазовый состав шлама в отвалах ранее работавшего комбината «Тувакобальт» представлен кальцитом, доломитом, кварцем, силикатами и арсенатами. Последние в процессе обжига шихты из шлама и соды (соотношение 1:1) превращаются в водорастворимый Na_3AsO_4 .

Скорость извлечения мышьяка в виде арсената натрия возрастает в интервале температуры обжига от 600 до 740 °C. Наивысшая скорость извлечения мышьяка равна 3,33 мг/мин, а максимальная степень его извлечения – 85% (со снижением содержания в шламе с ~4,0 до 0,7 масс. %), устанавливается при температуре 740 °C.

Термодинамический анализ показал, что в химических реакциях соды со всеми малорастворимыми арсенатами (исключение – арсенат железа (III)) наблюдается сдвиг равновесий в направлении образования продукта Na_3AsO_4 , что обусловлено их эндотермическими тепловыми эффектами ($\Delta H > 0$). Глубина сдвига равновесий с ростом температуры ослабевает вследствие уменьшения значений их ΔH . В случае взаимодействия FeAsO_4 с Na_2CO_3 из-за выделения теплоты (реакция экзотермическая, $\Delta H < 0$) с ростом температуры усиливается сдвиг равновесия в направлении обратной реакции, т.е. расходования Na_3AsO_4 .



Библиографический список

1. Копылов Н.И. Проблемы мышьяксодержащих отвалов. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2012. 182 с.
2. Бортникова С.Б., Гаськова О.Л., Бессонова Е.П. Геохимия техногенных систем. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2006. 169 с.
3. Mehmood A., Hayat R., Wasim M., Akhtar M.S. Mechanisms of arsenic adsorption in calcareous soils // J. agric. Boil. Sci. 2009. No. 1 (1). P. 59–65.
4. Deutsch W.J., Pavish M. In situ arsenic remediation complicated by carbonate // Procedia Earth and Planetary Science. 2013. No. 7. P. 211–214.
5. Набойченко С.С., Мамяченков С.В., Карелов С.В. Мышьяк в цветной металлургии: монография. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2004. 240 с.
6. Копылов Н.И., Каминский Ю.Д. Мышьяк. Новосибирск: Изд-во Сибирского университета, 2004. 367 с.
7. Исабаев С.М., Кузгибекова Х., Мильке Э.Г. Вывод мышьяка в нетоксичной сульфидной форме из медно-мышьяковых шламов // Комплексное использование минерального сырья. 1982. № 7. С. 74–76.
8. Twidwell L.G., Plessas L.G., Comba P.G., Dahnke D.R. Removal of arsenic from wastewaters and stabilization of arsenic bearing waste solids: summary of experimental studies // Journal of Hazardous Materials. 1994. Vol. 36. P. 69–80.
9. Лебедев В.И. Арсенидное кобальтовое месторождение Хову-Аксы: проблемы возрождения уникального кобальтового производства в Туве // Уникальные исследования XXI века. 2015. № 3 (3). С. 15–25.
10. Копылов Н.И., Каминский Ю.Д., Очур-оол А.П. Комбинированный способ извлечения мышьяка из отвалов // Химическая технология. 2011. Т.13. № 8. С. 498–500.
11. Молдурushку М.О. Влияние технологических параметров при извлечении мышьяка в раствор // Естественные и технические науки. 2014. № 4. С. 154–157.
12. Молдурushку М.О., Чульдum А.Ф., Кара-Сал Б.К. Исследование процесса выщелачивания огарка с применением многофакторного эксперимента // Успехи современной науки. 2017. № 11. С. 49–53.
13. Рогожников Д.А., Мамяченков С.В., Тропников Д.Л., Дизер О.А. Исследование равновесного распределения компонентов изучаемых систем при обжиге медно-цинкового сульфидного промпродукта // Вестник ИрГТУ. 2016. Т. 20. № 8. С. 154–160. DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-154-160
14. Kopylov N.I., Solotchina E.P., Shoeva T.E. Behavior of Tuva clays mixtures with slime and cake of dearsenation from Khovu-Aksy dumps during roasting // Complex Use of Mineral Resources. 2017. No. 2. P. 65–71.

References

1. Kopylov N.I. *Problemy mysh'yaksoderzhashchikh otvalov* [Problems of arsenic-containing dumps]. Novosibirsk: Geo Publ., 2012, 182 p. (In Russian)
2. Bortnikova S.B., Gas'kova O.L., Bessonova E.P. *Geokhimiya tekhnogennykh sistem* [Geochemistry of technogenic systems]. Novosibirsk: Geo Publ., 2006, 169 p. (In Russian)
3. Mehmood A., Hayat R., Wasim M., Akhtar M.S. Mechanisms of arsenic adsorption in calcareous soils. J. agric. Boil. Sci. 2009, no. 1 (1), pp. 59–65.
4. Deutsch W.J., Pavish M. In situ arsenic remediation complicated by carbonate. Procedia Earth and Planetary Science. 2013, no. 7, pp. 211–214.
5. Naboichenko S.S., Mamyachenkov S.V., Karelov S.V. *Mysh'yak v tsvetnoi metallurgii* [Arsenic in non-ferrous metallurgy]. Ekaterinburg: UrO RAN Publ., 2004, 240 p. (in Russian)
6. Kopylov N.I., Kaminskii Yu.D. *Mysh'yak* [Arsenic]. Novosibirsk: Siberian university Publ., 2004, 367 p. (In Russian)
7. Isabaev S.M., Kuzgibekova Kh., Mil'ke E.G. Arsenic removal in the non-toxic sulfide form from copper-arsenic sludge. *Kompleksnoe ispol'zovanie mineral'nogo syr'ya* [Complex use of mineral resources]. 1982, no. 7, pp. 74–76. (In Russian)
8. Twidwell L.G., Plessas L.G., Comba P.G., Dahnke D.R. Removal of arsenic from wastewaters and stabilization of arsenic bearing waste solids: summary of experimental studies. Journal of Hazardous Materials. 1994, vol. 36, pp. 69–80.
9. Lebedev V.I. The Khovu-Aksy arsenide cobalt deposit: renewal issues of the unique cobalt production in Tuva. *Unikal'nye issledovaniya XXI veka* [Unique researches of XXI century]. 2015, no. 3, pp. 15–25. (In Russian)
10. Kopylov N.I., Kaminskii Yu.D., Ochur-ool A.P. Combined method of arsenic removal from dumps. *Khimicheskaya tekhnologiya* [Chemical Technology]. 2011, vol.13, no. 8, pp. 498–500. (In Russian)
11. Moldurushku M.O. Effect of technological parameters on extraction of arsenic in solution. *Estestvennye i tekhnicheskie nauki* [Natural and Technical Sciences]. 2014, no. 4, pp. 154–157. (In Russian)
12. Moldurushku M.O., Chul'dum A.F., Kara-Sal B.K. The research of leaching of product of the roasting with application of factor experiment. *Uspekhi sovremennoi nauki* [Modern Science Success]. 2017, no. 11, pp. 49–53. (In Russian)
13. Rogozhnikov D.A., Mamyachenkov S.V., Tropnikov D.L., Dizer O.A. Study of the system component equilibrium distribution under copper-zinc sulfide middings roasting. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State



Technical University]. 2016, vol. 20, no. 8, pp. 154–160.
DOI: 10.21285/1814-3520-2016-8-154-160 (In Russian)
14. Kopylov N.I., Solotchina E.P., Shoeva T.E. Behavior
of Tuva clays mixtures with slime and cake of

dearsenation from Khovu-Aksy dumps during roasting.
Complex Use of Mineral Resources. 2017, no. 2,
pp. 65–71.

Критерии авторства

Молдурushку М.О., Чульдum А.Ф., Тас-ool Л.Х. про-
вели термодинамический анализ реакций арсенатов
с карбонатом натрия при обжиге отходов кобальто-
вого производства с помощью компьютерной про-
граммы HSC Chemistry 6.0, провели обобщение и
написали рукопись. Молдурushку М.О., Чульдum А.Ф.
несут ответственность за плагиат.

Authorship criteria

Moldurushku M.O., Chuldum A.F., Tas-ool L.Kh. have
conducted a computer program HSC Chemistry 6.0-
based thermodynamic analysis of arsenate reactions
with sodium carbonate under roasting of cobalt produc-
tion waste products, summarized the material and wrote
a manuscript. Moldurushku M.O., Chuldum A.F. are
responsible for plagiarism.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта
интересов.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 622.765

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-184-193>

ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЕАГЕНТА-ДЕПРЕССОРА ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ФЛОТАЦИИ УГЛИСТЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД

© А.И. Сосипаторов¹, Г.М. Панченко², В.В. Высотин³, М.А. Винокурова⁴, А.Ю. Чикин⁵

АО «Иркутский научно-исследовательский институт благородных металлов и алмазов»,
664025, Российская Федерация, г. Иркутск, б-р Гагарина, 38.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬЮ данного исследования является проверка эффективности воздействия реагента-депрессора отечественного производства при флотации углистых золотосодержащих руд различных месторождений. **МЕТОДЫ.** Для определения химического состава руды были использованы количественный рентгенофлуоресцентный, фазовый, атомно-абсорбционный, гравиметрический и ICP-AES анализы. Массовая доля углерода в органической форме определялась на приборе LecoSC-144 DR. Содержание золота определяли с помощью пробирно-гравиметрического анализа. Подготовка питания флотации проводилась с использованием центробежного концентратора Knelson KC-MD3. Флотационные исследования осуществлялись на хвостах гравитации с использованием флотомашин механического типа. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** По результатам исследования было установлено, что использование реагента – подавителя углерода в процессе флотационного обогащения повышает качество флотоконцентрата по содержанию золота при сохранении уровня извлечения ценного компонента, способствует снижению выхода флотоконцентрата за счет сокращения массовой доли органического углерода и породообразующих минералов руды. **ВЫВОДЫ.** В ходе исследований было установлено, что проверенный реагент отечественного производства является эффективным депрессором углеродистого вещества в процессе флотационного обогащения, что позволяет говорить о перспективе использования при флотации углистых золотосодержащих руд.

Ключевые слова: депрессор, природное углеродистое вещество, породообразующие минералы, золото, извлечение.

Информация о статье. Дата поступления 27 июня 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Сосипаторов А.И., Панченко Г.М., Высотин В.В., Винокурова М.А., Чикин А.Ю. Перспектива использования реагента-депрессора отечественного производства при флотации углистых золотосодержащих руд // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 184–193. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-184-193

¹Сосипаторов Андрей Игоревич, аспирант, инженер лаборатории обогащения руд, e-mail: Andrey3481659@mail.ru

Andrei I. Sosipatorov, Postgraduate student, Engineer of the Ore Benefication Laboratory, e-mail: Andrey3481659@mail.ru

²Панченко Галина Михайловна, ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения руд, e-mail: GalPanchenko@mail.ru

Galina M. Panchenko, Leading Researcher of the Ore Benefication Laboratory, e-mail: GalPanchenko@mail.ru

³Высотин Владислав Владимирович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории обогащения руд, e-mail: V_viad82_V@mail.ru

Vladislav V. Vyotin, Candidate of technical sciences, Leading Researcher of the Ore Benefication Laboratory, e-mail: V_viad82_V@mail.ru

⁴Винокурова Марина Александровна, старший научный сотрудник лаборатории обогащения руд, e-mail: MarVin4762@yandex.ru

Marina A. Vinokurova, Senior Researcher of the Ore Benefication Laboratory, e-mail: MarVin4762@yandex.ru

⁵Чикин Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, e-mail: Anchik53@mail.ru

Andrei Yu. Chikin, Doctor of technical sciences, Professor, e-mail: Anchik53@mail.ru



APPLICATION PROSPECTS OF DOMESTIC DEPRESSOR REAGENT UNDER CARBONACEOUS GOLD-BEARING ORE FLOTATION

A.I. Sosipatorov, G.M. Panchenko, V.V. Vysotin, M.A. Vinokurova, A.Yu. Chikin

Irkutsk Research Institute of Noble Metals and Diamonds JSC,
38, Gagarin blvd., Irkutsk, 664025, Russian Federation

ABSTRACT. The **PURPOSE** of this study is the efficiency test of a domestic depressor reagent under flotation of carbonaceous gold-bearing ores of various deposits. **METHODS.** Quantitative X-ray fluorescence, phase, atomic absorption, gravimetric and ICP-AES analyzes are used to determine the chemical composition of the ore. The mass fraction of the organic form of carbon is measured by the LecoSC-144 DR determinator. Gold content is determined using the assay-gravimetric analysis. Flotation feed is prepared using the Knelson KC-MD3 centrifugal concentrator. The flotation studies are carried out using gravity tailings and flotation machines of a mechanical type. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The study results show that the use of carbon suppressant reagent in flotation concentration increases the flotation concentrate quality by the gold content, while preserving the recovery level of the valuable component. It also contributes to the reduction in the yield of the flotation concentrate by decreasing the mass fraction of organic carbon and rock-forming minerals of the ore. **CONCLUSIONS.** The conducted study has found out the domestic reagent to be an effective depressant of a carbonaceous substance under flotation concentration. This fact allows to talk about its prospective use under flotation of carbonaceous gold-bearing ores.

Keywords: depressor, natural carbonaceous substance, rock-forming minerals, gold, extraction

Information about the article. Received June 27, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online 28 сентября 2018 г.

For citation. Sosipatorov A.I., Panchenko G.M., Vysotin V.V., Vinokurova M.A., Chikin A.Yu. Application prospects of domestic depressor reagent under carbonaceous gold-bearing ore flotation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 184–193. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-184-193 (In Russian)

Введение

В последние два десятилетия активно разрабатываются крупнообъемные близповерхностные месторождения золота с его относительно низким содержанием (0,5–2,0 г/т). Такие месторождения часто соседствуют с карбонатно-глинистыми породами, обогащенными кремнеземом и органическим веществом. Этот тип характерен для крупных месторождений, таких как Goldstrike и Gold Quarry в США, Нежданинское, Наталкинское, Советское, Олимпиадинское и Сухой Лог в России. Количество месторождений подобного типа на территории России составляет приблизительно 50% от всех золоторудных месторождений, в других странах – 20% [1, 2].

При цианировании золотых руд, содержащих углеродистое вещество, вследствие его высокой сорбционной активности

или так называемого эффекта Preg-robbing⁶, наблюдается преждевременное осаждение растворенного золота, что приводит к его существенным потерям с хвостами [3]. Известно, что сорбционно-активные вещества могут как физически сорбировать золотоцианистый комплекс, так и образовывать прочные металлоорганические соединения [4]. Нередко наличие в рудах углеродистых веществ не только затрудняет процесс цианирования, но и делает его нерентабельным вследствие низкого извлечения ценного компонента [5]. Для снижения сорбционной активности углеродистого вещества, входящего в состав руды, применяют различные методы и технологические приемы, которые включают флотацию, гидрохимическое окисление хлором, автоклавное окисление, окисли-

⁶Зайцев П.В. Автоклавное окисление золотосодержащих концентратов двойной упорности: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.02. Санкт-Петербург, 2015 г. / Zaitsev P.V. Autoclave oxidation of gold-containing concentrates of double refraction: Candidate's Dissertation in technical sciences: 05.16.02. St. Petersburg, 2015.



тельный обжиг [6, 7]. Одним из перспективных методов переработки углистых золото-содержащих руд является флотация с применением органических реагентов – депрессоров углеродистого вещества [8–10]. Данный метод позволяет выделить золото и золотосодержащие сульфиды в концентрат флотации, оставляя углерод в хвостах обогащения [6, 11, 12].

Ранее в Иркутском научно-исследовательском институте благородных металлов и алмазов (АО «Иргиредмет») были проведены исследования по флотации на хвостах гравитационного обогащения углистой золотосодержащей руды с применением реагента – подавителя углерода – Р-2, представляющего собой смесь

сополимеров полиметиленафталинсульфоната натрия, оптимизированного молекулярномассового распределения, полученного в результате органического синтеза и модификатора, обеспечивающего улучшение эксплуатационных свойств⁷. По результатам исследований установлено, что добавление Р-2 в основную флотацию способствует снижению содержания органического углерода во флотоконцентрате с 3,52 до 0,97% при повышении качества концентрата по содержанию золота с 38,4 до 55,4 г/т и увеличению извлечения металла с 73,62 до 82,99% [13]. В продолжение данной работы проведены исследования на ряде руд подобного типа с использованием реагента Р-2.

Методы исследования

Для определения химического и минералогического состава руды были выполнены количественный рентгенофлуоресцентный, фазовый, атомно-абсорбционный, гравиметрический и ICP-AES анализы. Содержание золота определяли с помощью пробирно-гравиметрического анализа. Массовую долю углерода в органической форме определяли с помощью прибора Leco RC-612. Подготовка питания флотации проводилась с использованием центробежного концентратора Knelson KC-MD3 согласно методике проведения теста GRG⁸. Флотационные исследования осуществля-

лись на хвостах гравитации с использованием флотомашин механического типа с объемом камеры 3 и 0,5 л. в соответствии с «Методикой флотационного обогащения золотых и комплексных золотосодержащих руд и хвостов гравитационного обогащения»⁹.

В ходе лабораторных исследований были установлены оптимальные условия флотации: реагентный режим, плотность питания, продолжительность флотации, очередность подачи и продолжительность агитации с реагентами.

Результаты и их обсуждение

Флотационные исследования пробы руды № 1. Проба руды № 1 состоит преимущественно из оксида кремния – 79,5%. Главным рудным компонентом является железо. Его доля находится на

уровне 2,72%, из них в оксидной форме – 1,86%, на долю сульфидного железа приходится 0,86%. Массовая доля серы (0,67%) почти полностью находится в сульфидной форме. Рудная минерализа-

⁷TU 20.59.59-001-65302410-2018. Реагент Р2. Технические условия. Разработчик: ООО «Биополикрафт». М., 2018. 3 с. / TU 20.59.59-001-65302410-2018. P2 Reagent. Technical conditions. Developer: Biopolycraft LLC. M., 2018. 3 p.

⁸Методика проведения теста GRG. Иркутск: АО «Иргиредмет», 2014. 6 с. / GRG test. Irkutsk: Irgiredmet JSC, 2014. 6 p.

⁹Методика флотационного обогащения золотых и комплексных золотосодержащих руд и хвостов гравитационного обогащения. Иркутск: АО «Иргиредмет», 2014. 28 с. / Methodology of flotation concentration of gold and complex gold-bearing ores and gravity concentration tails. Irkutsk: Irgiredmet JSC, 2014. 28 p.



ция представлена преимущественно пиритом и образует главным образом гнездовую или линзовидную вкрапленность. Углеродистое вещество представлено керогеном, количество углерода в органической форме составляет 0,80%, а массовая доля карбонатного углерода составляет 0,89%. Основным полезным компонентом пробы ру-

ды является золото, содержание которого составляет 1,91 г/т.

На основании опытов в открытом цикле были проведены эксперименты с имитацией непрерывного процесса, по схеме, представленной на рис. 1. Результаты опытов приведены в табл. 2.

Таблица 1

Реагентный режим флотационного обогащения

Table 1

Reagent regime of flotation concentration

Операция	Расход реагента на 1 т, г			Продолжительность флотации, мин	Массовая доля твердого, %
	Р-2	БКК	ПМ-2		
Крупность питания флотации 85–90% класса минус 0,071 мм (класс минус 0,1 мм)					
I-я основная флотация	250	100	75	2	25
II-я основная флотация	–	50	12,5	5	
Контрольная флотация	–	25	12,5	8	
I-я перечистная флотация	–	–	–	1,5	10
II-я перечистная флотация	–	–	–	1	

Примечание. БКК – бутиловый ксантогенат калия; ПМ-2 – вспениватель марки ПМ, представляющий собой смесь алифатических спиртов нормального и изостроения, по своим свойствам близок к метилизобутилкарбинолу (МИБК).

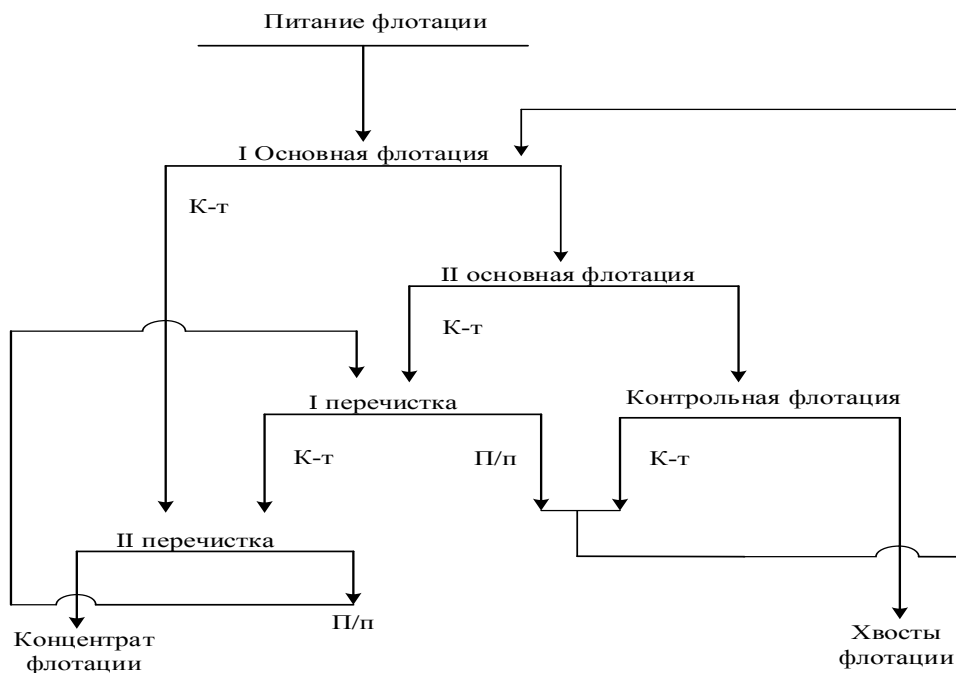


Рис. 1. Схема проведения флотационного обогащения в замкнутом цикле пробы руды № 1
Fig. 1. Flow diagram of flotation concentration in a closed cycle of the ore sample no. 1



Таблица 2

Баланс металла по конечным продуктам флотации в условиях замкнутого цикла

Table 2

Balance of metal by end flotation products in a closed-cycle

Наименование продуктов	Выход, %	Золото		Органический углерод	
		Содержа- ние, г/т	Извлече- ние, %	Содержа- ние, %	Извлече- ние, %
Без депрессора (опыт 1)					
Концентрат флотации	1,52	30,5	82,46	4,22	8,74
Хвосты флотации	98,48	0,1	17,54	0,68	91,26
Исходное питание	100,0	0,56	100,0	0,73	100,0
С реагентом-депрессором Р-2 (опыт 2)					
Концентрат флотации	0,67	71,4	81,41	1,27	0,91
Хвосты флотации	99,93	0,11	18,59	0,93	99,09
Исходное питание	100,0	0,58	100,0	0,94	100,0

По данным табл. 2 видно, что реагент Р-2 показал положительные результаты по снижению содержания (с 4,22 до 1,27%) и извлечения (с 8,74 до 0,91%) углеродистого вещества в концентрат флотации и способствовал повышению качества флотоконцентрата по содержанию золота (с 30,5 до 71,4 г/т), уменьшению выхода концентрата (с 1,52 до 0,67%) при незначительном снижении уровня извлечения.

Флотационные исследования пробы руды № 2. Проба руды № 2 на 72,1% состоит из оксида кремния. В количестве 11,5% присутствует глинозем. Сумма оксидов щелочных металлов ($K_2O + Na_2O$) составляет 7,78%, по массе более чем в два раза преобладает оксид натрия. Рудообразующие компоненты в основном представлены железом, мышьяком и серой. Из них по массе значительно преобладает железо. По результатам химического анализа массовая доля общего железа составляет 2,80%, мышьяка – 1,13%, серы – 0,84%. Сера практически полностью присутствует в сульфидной форме. Рудные минералы представлены сульфидами, гидроксидами, оксидами железа и мышьяка. Суммарная массовая доля сульфидов находится на уровне 3%. Массовая доля арсенопирита составляет 2,3%, пирита – 0,7%, в редких зернах (р.з.) встречаются сфалерит, пирротин и халькопирит. Количество углерода в органической форме со-

ставляет 0,3%, диоксида углерода – 2,92%. Содержание золота составляет 1,56 г/т.

Результаты, представленные в табл. 4, свидетельствуют о том, что использование реагента Р-2 в условиях непрерывного процесса приводит к повышению содержания золота во флотоконцентрате – 18 г/т против 14,9 г/т, и снижению выхода – 4,53% против 5,31%, за счет снижения массовой доли органического углерода во флотоконцентрате – с 4,25% до 2,23%. При сохранении высокого уровня извлечения ценного компонента.

Флотационные исследования пробы руды № 3. Проба руды № 3 представлена литофильными компонентами, суммарная доля которых составляет 94,3%, со значительными преобладаниями оксида кремния – 72,4%. На долю глинозема приходится 11,42%. Основными рудообразующими компонентами являются железо и сера. Доля общего железа – 5,30%, из них в сульфидной форме – 1,82%, в оксидной форме – 3,48%. Массовая доля общей серы – 1,78%, сера находится преимущественно в сульфидной форме. Основными рудными минералами руды являются сульфиды с существенным преобладанием пирита и пирротина, их суммарная доля составляет от 4,1 до 4,5%. Углеродистое вещество представлено керогеном, количество углерода в органической форме – 0,97%. Содержание золота – 1,63 г/т.



Таблица 3

Реагентный режим флотационного обогащения

Table 3

Reagent regime of flotation concentration

Операция	Расход реагента на 1 т, г				Продолжительность флотации, мин	Массовая доля твердого, %
	P-2	Аэро 3418	БКК	T-92		
Крупность питания флотации 85-90 % класса минус 0,071 мм (класс минус 0,1 мм)						
I-я основная флотация	150	30	70	60	2	25
II-я основная флотация	–	15	35	40	6	
Контрольная флотация	–	–	50	40	15	
Перечистная флотация	–	–	–	–	1	10

Примечание. Аэро 3418 (собиратель) – модифицированный дитиофосфинат AEROPHINE 3418A; T-92 – (флото-реагент-оксаль, пенообразователь) – смесь многоатомных спиртов кубовый продукт стадии ректификации диметилдиоксана.

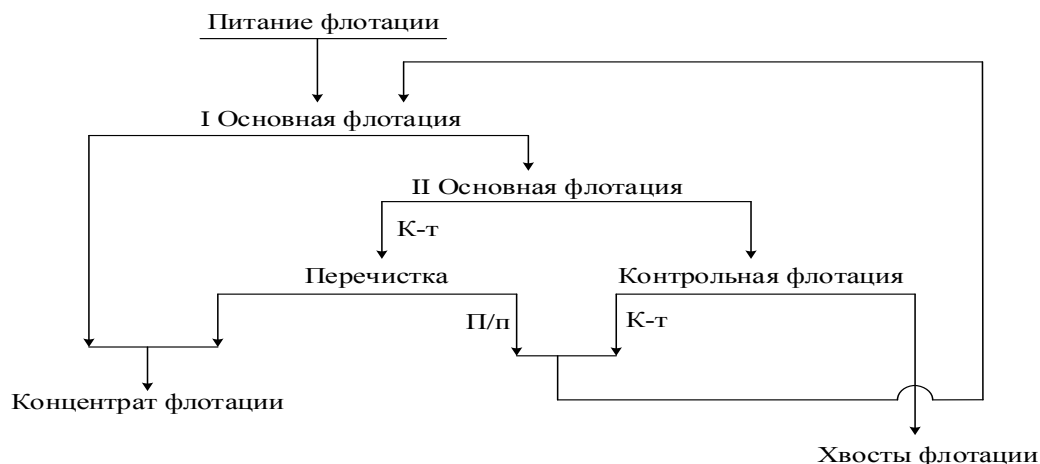


Рис. 2. Схема проведения флотационного обогащения в замкнутом цикле пробы руды № 2

Fig. 2. Flow diagram of flotation concentration in a closed cycle of the ore sample no. 2

Таблица 4

Баланс металла по конечным продуктам флотации в условиях замкнутого цикла

Table 4

Balance of metal by end flotation products in a closed-cycle

Наименование продуктов	Выход, %	Золото		Органический углерод	
		Содержание, г/т	Извлечение, %	Содержание, %	Извлечение, %
Без реагента-депрессора (опыт 1)					
Концентрат флотации	5,39	14,9	90,4	4,25	76,4
Хвосты флотации	94,61	0,09	9,6	0,08	23,6
Исходное питание	100,0	0,89	100,0	0,3	100,0
С реагентом-депрессором Р-2 (опыт 2)					
Концентрат флотации	4,53	18,0	90,5	2,23	30,6
Хвосты флотации	95,47	0,09	9,5	0,24	69,4
Исходное питание	100,0	0,9	100,0	0,33	100,0



Таблица 5

Реагентный режим флотационного обогащения

Table 5

Reagent regime of flotation concentration

Операция	Расход реагента на 1 т, г			Продолжительность флотации, мин	Массовая доля твердого, %
	P-2	БКК	T-92		
Крупность питания флотации 85–90% класса -0,071 мм (класс -0,1 мм)					
Основная флотация	250	50	40	4	25
Контрольная флотация	–	30	20	8	
I-я перечистная флотация	–	–	–	1,5	10
II-я перечистная флотация	–	–	–	1,5	

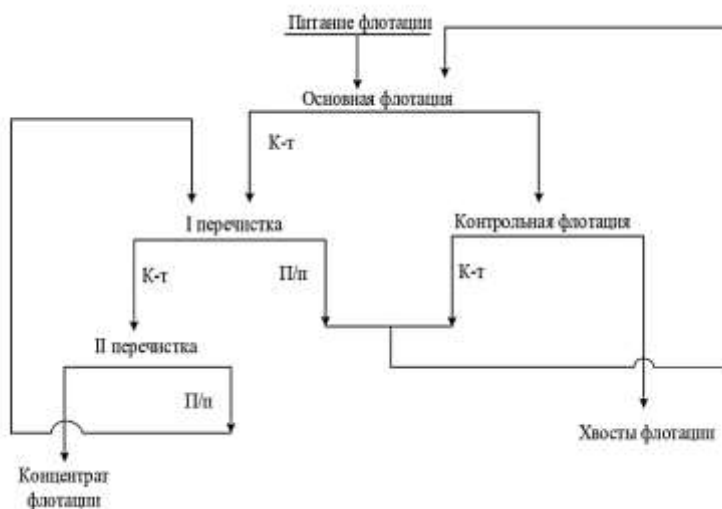


Рис. 3. Схема проведения флотационного обогащения в замкнутом цикле пробы руды № 3
Fig. 3. Flow diagram of flotation concentration in a closed cycle of the ore sample no. 3

Таблица 6

Баланс металла по конечным продуктам флотации в условиях замкнутого цикла

Table 6

Balance of metal by end flotation products in a closed-cycle

Наименование продукта	Выход, %	Золото		Сера сульфидная		Органический углерод	
		Содержание, г/т	Извлечение, %	Содержание, %	Извлечение, %	Содержание, %	Извлечение, %
Без реагента-депрессора (опыт 1)							
Концентрат флотации	6,80	8,70	87,58	18,00	56,77	9,80	33,81
Хвосты флотации	93,20	0,09	12,42	1,00	43,23	1,40	66,19
Исходное питание	100,00	0,70	100	2,16	100,00	1,97	100,00
С реагентом-депрессором Р-2 (опыт 2)							
Концентрат флотации	2,88	22,80	93,23	42,10	55,49	1,03	1,50
Хвосты флотации	97,12	0,05	6,77	1,00	44,51	1,97	98,48
Исходное питание	100,00	0,71	100	2,18	100,00	1,94	100,00



По результатам опыта, проведенного, как и предыдущие, в замкнутом цикле, видно (см. табл. 6), что использование реагента Р-2 способствует повышению содержания золота в концентрате с 8,7 до 22,8 г/т, сокращению выхода концентрата с 6,8 до 2,88% при существенном снижении массовой доли органического углерода с 9,8 до 1,03% и его извлечения с 33,81 до 1,50%. Извлечение ценного компонента увеличилось с 87,58 до 93,23%.

Также по данным табл. 6 видно, что с использованием реагента Р-2 массовая доля сульфидной серы возрастает с 18,00 до 42,10% при практически равном извлечении во флотоконцентрат. Кроме того, анализ полученных результатов показывает, что при использовании реагента Р-2

наблюдается заметное снижение выхода концентрата флотации и повышение содержания золота в нем при сохранении уровня извлечения. Исходя из этого можно предположить, что реагент Р-2 оказывает депрессирующее действие как на углеродистое вещество, так и на порообразующие компоненты руды. Для подтверждения данного предположения выполнен минералогический анализ продуктов флотационного обогащения руды № 3 (табл. 7).

Результаты табл. 7 показывают, что во флотоконцентрате, полученном с использованием реагента Р-2, массовая доля порообразующих минералов значительно ниже, чем в концентрате без его использования – 19,4% против 53%, а доля сульфидов выше – 74,5 против 34,0%.

Таблица 7

Минеральный состав продуктов флотации (массовая доля минералов, %) по двум вариантам реагентного режима

Table 7

Mineral composition of flotation products (mass fraction of minerals, %) by two variants of reagent regime

Минералы и группы минералов	Реагентный режим			
	без депрессора Р-2		с депрессором Р-2	
	Концентрат	Хвосты	Концентрат	Хвосты
Порообразующие минералы: кварц, слюдисто-гидрохлоритовые образования (мусковит, серицит, биотит), хлорит, полевые шпаты (плагиоклазы, КПШ), карбонаты (сидерит, кальцит, анкерит)	53,0	95,6	19,4	94,9
Сульфиды				
всего	34,0	1,9	74,5	2,0
в том числе:				
пирит	32,5	1,8	72,0	1,9
пирротин	1,3	0,1	2,0	0,1
халькопирит	0,2	Р.з.	0,5	Р.з.
Арсенопирит, сфалерит, галенит	Редкие и единичные зерна			
Гидроксиды железа (лимонит, гетит, гидрогетит)	0,8	0,5	0,7	0,5
Ярозит	0,7	Р.з.	3,2	Р.з.
Углеродистое вещество*	11,5	2,0	2,2	2,6
Итого	100,0	100,0	100,0	100,0

*Углеродистое вещество пересчитано с учетом содержания органического углерода.



Выводы

Результаты проведенных исследований показали, что использование реагента отечественного производства способствует значительному повышению качества концентрата по содержанию золота и сульфидных минералов при сохранении высокого уровня извлечения ценного компонента.

Реагент Р-2 является эффективным депрессором углеродистого вещества в процессе флотационного обогащения, так

как на каждом из проверенных образцов руды отмечалось значительное снижение содержания и извлечения углеродистого вещества во флотоконцентрат. Установлено, что реагент Р-2 наряду с углеродистым веществом способен депрессировать породообразующие компоненты руды. В целом результаты исследований свидетельствуют о перспективности использования реагента Р-2 при флотации углистых золотосодержащих руд.

Библиографический список

1. Меретуков М.А. Золото и природное углеродистое вещество. М.: Руда и металлы, 2007. 63 с.
2. Развозжаева Э.А. Геохимия углерода и благородных металлов в осадочно-метаморфических комплексах складчатого обрамления Сибирской платформы. Новосибирск: АИ «Гео», 2015. 135 с.
3. Ковалев В.Н., Голиков В.В., Рылов Н.В. Анализ и выбор технологии переработки упорной золото-сульфидной углеродсодержащей руды месторождения Бакырчик // Обогащение руд. 2017. № 2. С. 21–25.
4. Abotsi M.K., Osseo-Asare K. Surface Chemistry of carbonaceous gold ores I. Characterization of the carbonaceous matter and adsorption behavior in aurocyanide solution // International Journal of Mineral Processing. 1986. No. 18. P. 217–236.
5. Зайцева М.Л. Исследование сорбционных свойств углистых веществ при цианировании золотых руд // Цветные металлы. 1973. № 1. С. 77–79.
6. Барченков В.В. Технология гидрометаллургической переработки золотосодержащих концентратов с применением активных углей. Чита: Поиск. 2004. 242 с.
7. Гурман М.А., Александрова Т.Н., Щербак Л.И. Флотационное обогащение бедной золото – и углеродсодержащей руды // Горный журнал. 2017. № 2. С. 70–73.
8. Dunne R. Flotation of gold and gold-bearing ores // Developments in Mineral Processing. 2005. Vol. 15. P. 343–309.
9. Матвеева Т.Н., Иванова Т.А., Гетман В.В., Громова Н.К. Новые флотационные реагенты для извлечения микро- и наночастиц благородных металлов из упорных руд // Горный журнал. 2017. № 11. С. 89–93.
10. Глембоцкий В.А., Классен В.И. Флотационные методы обогащения. М.: Недра, 1981. 300 с.
11. Pyke B.I., Johnston R.F., Brooks P. The characterisation and behaviour of carbonaceous material in a refractory gold bearing ore // Minerals Engineering. 1999. Vol. 12. P. 851–862.
12. Пат. № 2655509 РФ, МПК В03Д 1/02. Способ переработки углистых золотосодержащих руд / Г.М. Панченко, В.В. Высотин, М.А. Винокурова, А.И. Сосипаторов, А.Ю. Коблов; заявитель и патентообладатель АО «Иргиредмет». № 2016149980; заявл. 19.12.2016; опубл. 09.06.2018.
13. Сосипаторов А.И., Панченко Г.М., Чикин А.Ю., Высотин В.В., Винокурова М.А., Коблов А.Ю. К вопросу о депрессии углерода при флотации углистых золотосодержащих руд // Вестник ИРГТУ. 2017. Т. 21. № 2. С. 155–162. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-2-155-162>

References

1. Meretukov M.A. *Zoloto i prirodnoe uglerodistoe veshchestvo* [Gold and natural carbonaceous matter]. Moscow: Ruda i Metally Publ., 2007, 63 p. (In Russian)
2. Razvozhaeva E.A. *Geokhimiya ugleroda i blagorodnykh metallov v osadochno-metamorficheskikh kompleksakh skladchatogo obramleniya Sibirskoi platformy* [Geochemistry of carbon and noble metals in sedimentary metamorphic complexes of the Siberian platform folded frame]. Novosibirsk: AI "GEO" Publ., 2015, 135 p. (In Russian)
3. Kovalev V.N., Golikov V.V., Rylov N.V. Analysis and selection of processing technology for the refractory gold sulfide carbonaceous ore of the Bakyrchik deposit. *Obogashchenie rud* [Ore Dressing]. 2017, no. 2, pp. 21–25. (In Russian)
4. Abotsi M.K., Osseo-Asare K. Surface Chemistry of carbonaceous gold ores I. Characterization of the carbonaceous matter and adsorption behavior in aurocyanide solution. *International Journal of Mineral Processing*. 1986, no. 18, pp. 217–236.
5. Zaitseva M.L. Studing the sorption properties of carbonaceous substances under gold ore cyanidation. *Tsvetnye metally* [Non-Ferrous Metals]. 1973, no. 1, pp. 77–79. (In Russian)



6. Barchenkov V.V. *Tekhnologiya gidrometallurgicheskoi pererabotki zolotosoderzha-shchikh kontsentratsionov s primeneniem aktivnykh uglei* [Technology of hydrometallurgical processing of gold-containing concentrates with the use of active coals]. Chita: Poisk Publ., 2004, 242 p. (In Russian)
7. Gurman M.A., Aleksandrova T.N., Shcherbak L.I. Flotation concentration of lean gold and carboniferous ore. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2017, no. 2, pp. 70–73. (In Russian)
8. Dunne R. Flotation of gold and gold-bearing ores. *Developments in Mineral Processing*. 2005, vol. 15, pp. 343–309.
9. Matveeva T.N., Ivanova T.A., Getman V.V., Gromova N.K. New flotation reagents for extraction of micro- and nanoparticles of noble metals from refractory ores. *Gornyi zhurnal* [Mining Journal]. 2017, no. 11, pp. 89–93. (In Russian)

Критерии авторства

Сосипаторов А.И., Панченко Г.М., Высотин В.В., Винокурова М.А., Чикин А.Ю. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

10. Glembotskii V.A., Klassen V.I. *Flotatsionnye metody obogashcheniya* [Flotation concentration methods]. Moscow: Nedra Publ., 1981, 300 p. (In Russian)
11. Pyke B.I., Johnston R.F., Brooks P. The characterisation and behaviour of carbonaceous material in a refractory gold bearing ore. *Minerals Engineering*. 1999, vol. 12, pp. 851–862.
12. Panchenko G.M., Vysotin V.V., Vinokurova M.A., Sosipatorov A.I., Koblov A.Yu. *Sposob pererabotki uglistykh zolotosoderzhashchikh rud* [Processing method of carbonaceous gold-bearing ores]. Patent RF no. 2655509, 2018.
13. Sosipatorov A.I., Panchenko G.M., Chikin A.Yu., Vysotin V.V., Vinokurova M.A., Koblov A.Y. To carbon depression under carbonaceous gold ore flotation. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 2, pp. 155–162. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2017-2-155-162>. (In Russian)

Authorship criteria

Sosipatorov A.I., Panchenko G.M., Vysotin V.V., Vinokurova M.A., Chikin A.Yu. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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



Оригинальная статья / Original article

УДК 624.042.12

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2018-9-194-204>

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТОСПОСОБНОСТИ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ОБОРУДОВАНИЯ ТРУБОУКЛАДЧИКА

© П.А. Корчагин¹, А.Б. Летопольский², И.А. Тетерина³

Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ),
644080, Российская Федерация, г. Омск, пр-т Мира, 5.

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. В статье представлен вариант совершенствования конструкции дополнительной опоры стрелы трубоукладчика. Предложенное техническое решение позволяет увеличить плавность укладки трубы и повысить устойчивость трубоукладчика в рабочем режиме. Результат достигается путем добавления дополнительных элементов в конструкцию опоры стрелы трубоукладчика. Целью работы является проверка на прочность и работоспособность предложенного оборудования трубоукладчика. **МЕТОДЫ.** Прочностной расчет предлагаемой конструкции существующим методом достаточно трудоемок. Для определения критических напряжений, величин деформации и максимальных перемещений в конструкции использован программный продукт Solid Works. **РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ.** В предложенной конструкции грузовая стрела соединена с опорой, состоящей из гидравлического цилиндра и металлической основы, используемой для крепления цилиндра к опоре с помощью болтового соединения. Для подтверждения работоспособности предложенного конструкторского решения приведены зависимости, составленные на основании расчетной схемы рабочего оборудования трубоукладчика. Расчетные зависимости позволяют определить величину нагрузок, действующих на трубоукладчик. **ВЫВОДЫ.** Результаты теоретических исследований, проведенных в программном продукте Solid Works, представлены графически и отражают напряжения, перемещения и деформации в конструкции стрелы машины для укладки магистрального трубопровода. Дополнительно в результате исследований установлена величина запаса прочности в конструкции опоры стрелы трубоукладчика. **Ключевые слова:** трубоукладчик, строительство трубопровода, строительно-дорожные машины, магистральный трубопровод, стрела трубоукладчика, рабочее оборудование.

Информация о статье. Дата поступления 08 июля 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Корчагин П.А., Летопольский А.Б., Тетерина И.А. Результаты исследований работоспособности модернизированного оборудования трубоукладчика // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 194–204. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-194-204

RESULTS OF WORKING CAPACITY RESEARCH OF PIPELAYER IMPROVED EQUIPMENT

P.A. Korchagin, A.B. Letopolsky, I.A. Teterina

Siberian State Automobile and Highway University (SibADI),
5, Mir pr., Omsk, 644080, Russian Federation

¹Корчагин Павел Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры подъемно-транспортных, тяговых машин и гидроприводов, e-mail: Korchgin_PA@mail.ru

Pavel A. Korchagin, Doctor of technical sciences, Professor of the Department of Lifting, Transporting, Traction Machinery and Hydraulic Drives, e-mail: Korchgin_PA@mail.ru

²Летопольский Антон Борисович, кандидат технических наук, доцент кафедры техники для строительства и сервиса нефтегазовых комплексов и инфраструктур, e-mail: Antooooon-85@mail.ru

Anton B. Letopolsky, Candidate of technical sciences, Associate Professor of the Department of Machinery for Construction and Service of Oil and Gas complexes and Infrastructures, e-mail: Antooooon-85@mail.ru

³Тетерина Ирина Алексеевна, кандидат технических наук, научный сотрудник научно-исследовательского отдела, e-mail: iateterina@mail.ru

Irina A. Teterina, Candidate of technical sciences, Research Associate of the Research Department, e-mail: iateterina@mail.ru



ABSTRACT. PURPOSE. The paper introduces a new variant of the improved design of a pipelayer boom additional support. The proposed technical solution increases pipelaying smoothness and improves pipelayer stability when in operation. The result is achieved by adding extra elements into the construction of the pipelayer boom support. The purpose of the work is to check the strength and performance of the proposed pipelayer equipment. **METHODS.** The existing method of strength calculation of the proposed design is rather laborious. The software product Solid Works is used to determine the critical stresses, strain values and maximum shifts in the design. **RESULTS AND THEIR DISCUSSION.** The cargo boom in the proposed construction is joined with the support, which consists of a hydraulic cylinder and a metal base used for cylinder fixation to the support with bolted-type connection. The dependences gained from the computation pattern of the pipelayer working equipment are given to prove the efficiency of the proposed design solution. The calculated dependences allow to determine the rate of the loads applied to the pipelayer. **CONCLUSIONS.** The results of the theoretical researches carried out in Solid works are represented by diagrams and show the stresses, shifts and deformations in the design of a pipelayer boom used for long-distance pipeline laying. Moreover, the size of the strength margin in the pipelayer boom support structure has been determined.

Keywords: pipelayer, pipeline construction, road building machines, long-distance pipeline, pipelayer boom, working equipment

Information about the article. Received June 8, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Korchagin P.A., Letopolsky A.B., Teterina I.A. Results of working capacity research of pipelayer improved equipment. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = Proceedings of Irkutsk State Technical University, 2018, vol. 22, no. 9, pp. 194–204. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-194-204 (In Russian)

Введение

Трубоукладчик – строительно-дорожная машина узкой направленности, применяемая при строительстве и ремонте трубопроводов⁴ [1]. Трубоукладчик представляет собой подъемный кран со стрелой, расположенной сбоку. Способность подъема одного и того же груза трубоукладчиком при различных наклонах стрелы непостоянна. По своему основному назначению трубоукладчик подвергается главным образом внешним вертикальным нагрузкам, прикладываемым к его грузовому крюку, к которым относятся вес штучного жесткого груза либо вес приподнятого упругого участка прокладываемого трубопровода [2]. Второй вариант внешней нагрузки носит сложный характер, так как она зависит не только от приподнятого трубопровода, но и от формы его прогиба [2].

Движение трубоукладчика по неровностям микрорельефа, а также несогласованные действия машинистов при групповой работе машин с общим грузом приводят к тому, что форма прогиба трубопрово-

да в вертикальной плоскости постоянно меняется, происходит перераспределение массы приподнятого участка между машинами [3]. Другими словами, если при работе со штучным жестким грузом нагрузка на рабочее оборудование постоянна и зависит только от массы этого груза, то при работе с трубопроводом она носит переменный характер, так как зависит от многих постоянно меняющихся технологических факторов, прежде всего, от пролетного веса, т.е. параметров трубопровода [2].

В целях обеспечения безопасности проведения работ по укладке трубопровода необходимо было усовершенствовать конструкцию рабочего оборудования. Поэтому авторами настоящей статьи разработана новая конструкция оборудования трубоукладчика. В предложенной конструкции грузовая стрела соединена с опорой, состоящей из гидравлического цилиндра и металлической основы, при этом крепление цилиндра к опоре производится с помощью болтового соединения (рис. 1).

⁴ГОСТ Р 52079-2003. Трубы стальные сварные для магистральных газопроводов, нефтепроводов и нефтепродуктопроводов. Технические условия; принят и введен в действие постановлением Госстандарта России от 09.06.2003 г., протокол № 188-ст / GOST R 52079-2003. Steel welded pipes for main gas pipelines, oil pipelines and oil product pipelines. Technical conditions; adopted and put into effect by the resolution of the Gosstandart of Russia of 9 June 2003, protocol No. 188-st

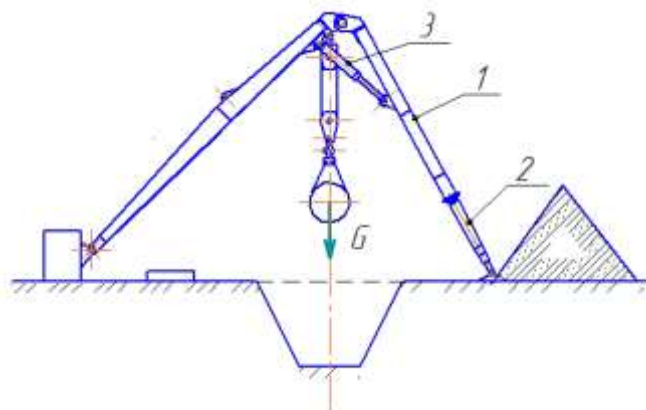


Рис. 1. Стрела трубоукладчика, оснащенная опорой:
1 – опора; 2 – гидроцилиндр; 3 – гидроцилиндр выдвижения опоры
Fig. 1. Pipelayer boom equipped with a support:
1-support; 2-hydraulic cylinder; 3- support extension hydraulic cylinder

Подтверждение работоспособности и проверка прочности предложенной конструкции и являлась целью исследования,

результаты которого представлены в данной публикации.

Прочностной расчет усовершенствованного оборудования трубоукладчика

У крана со стрелой, расположенной сбоку, каким и является трубоукладчик, способность к подъему одного и того же груза в ряде вариантов наклона стрелы непостоянна. В положении стрелы, близком к вертикальному, трубоукладчик способен поднять груз большей массы, чем при увеличении вылета стрелы, в силу возможного опрокидывания машины в сторону груза [2]. При выполнении рабочих операций часто нагрузки, оказываемые на рабочее оборудование, не соответствуют грузоподъемно-

сти машины. В этом случае возникает опасность опрокидывания трубоукладчика [1].

На рис. 2 представлена схема укладки готовой нитки трубопровода в траншею. Для выполнения расчетов предложенного конструкторского решения необходимо знать расстояние между точками подвеса трубопровода l_1-l_4 , высоту подъема трубопровода h_1-h_3 , глубину траншеи $h_{тр}$, нагрузку в точках подвеса трубопровода R_0, K_1, K_2, K_3, R_A .

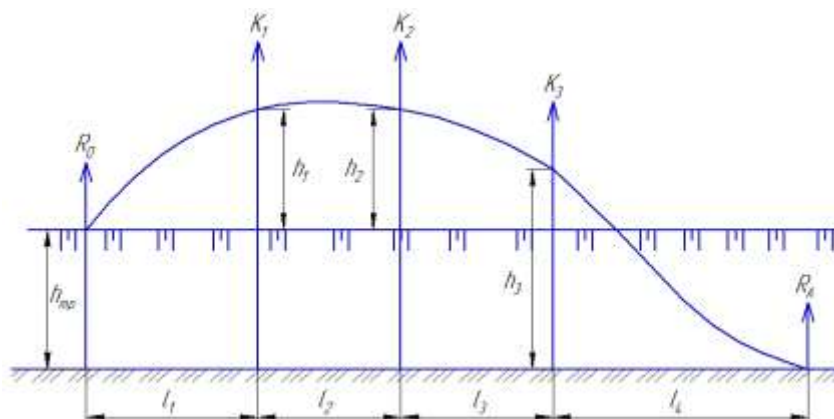


Рис. 2. Расчетно-технологическая схема укладки трубопровода
Fig. 2. Calculation and technological scheme of pipeline construction



Для определения величины нагрузки на крюк трубоукладчика был произведен расчет параметров траншеи и минимального количества трубоукладчиков при выполнении рабочей операции [4].

Глубина траншеи:

$$h_{tr} = 0,8 + D_{tr}, \quad (1)$$

где D_{tr} – диаметр трубопровода.

Ширина траншеи:

$$B_{tr} = 1,5 \cdot D_{tr}. \quad (2)$$

Оптимальные расстояния между точками подвеса трубопровода (см. рис. 2) рассчитывались по формулам:

$$l_1 = 2,46 \cdot \sqrt[4]{\frac{EIh_1}{q}}; \quad (3)$$

$$l_2 = 1,22 \cdot \sqrt[4]{\frac{EIh_1}{q}}; \quad (4)$$

$$l_3 = 1,22 \cdot \sqrt[4]{\frac{EIh_3}{q}}; \quad (5)$$

$$l_4 = 2,46 \cdot \sqrt[4]{\frac{EIh_3}{q}}; \quad (6)$$

где EI – жесткость укладываемого трубопровода; q – вес 1 м трубопровода; h_1, h_2 – высота подъема трубопровода ($h_1 = h_2, h_3 = h_{tr} + 0,5$).

Нагрузка на трубоукладчики (см. рис. 2) определялась по следующим формулам [4]:

$$K_1 = q \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot l_1 + \frac{1}{2} \cdot l_2 \right); \quad (7)$$

$$K_2 = q \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot l_2 + \frac{1}{2} \cdot l_3 \right); \quad (8)$$

$$K_3 = q \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot l_3 + \frac{2}{3} \cdot l_4 \right). \quad (9)$$

Анализ полученных результатов при определении нагрузок в точках подвеса трубопровода с грузовой характеристикой трубоукладчика ТГ-124 (таблица) в зависимости от вылета крюка позволил сделать вывод, что на одну из точек подвеса в ходе рабочей операции действует нагрузка, равная 93742 Н, что не соответствует грузоподъемности трубоукладчика, равной 67000 Н, при вылете крюка на 3,96 м⁴ [1].

Конструкция стрелы модернизированного трубоукладчика состоит из двух частей – основной стрелы и дополнительной опоры, соединенных между собой нежесткой связью [4]. Отличительная особенность конструкции заключается в том, что опора стрелы выполнена в виде подвешенного гидравлического цилиндра, который шарнирно связан с башмаком [4, 5]. В качестве гидроцилиндра предлагается использовать гидравлический цилиндр из стандартного ряда 55111-8603010⁴ [1].

Грузовая характеристика трубоукладчика ТГ-124 Pipelayer TG-124 load capacity

Вылет стрелы, м	1,5	2,5	3,5	4,5	5,6
Грузоподъемность с откинутым противовесом при коэффициенте устойчивости 1,4, т	12,5	10,9	7,6	5,75	4,6



На рис. 3 схематично отражена стрела трубоукладчика, оснащенного опорой, обозначены действующие силы реакций опорных поверхностей и нагрузки, возникающие при укладке трубопровода в траншею⁵.

Для определения значений реакций R_{Ax} , R_{Ay} , R_{Cx} и R_{Cy} необходимо конструкцию разбить на две части по нежесткой связи в шарнире В, рассмотрев равновесие каждой из частей, составляя уравнение равновесия

сил (рис. 4). Как результат, в шарнире В возникают новые реакции – R_{Bx} и R_{By} (рис. 4, b).

Для определения значения неизвестных сил составлены три уравнения равновесия сил:

- сумма сил относительно оси X;
- сумма сил относительно оси Y;
- сумма моментов относительно точки А [6, 7]:

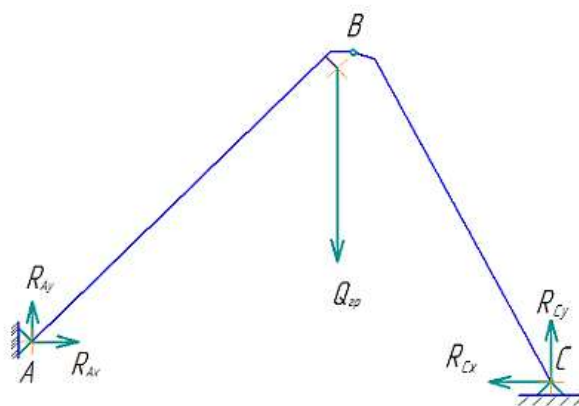


Рис. 3. Силы реакции и нагрузки, действующие на стрелу
Fig. 3. Reaction forces and stresses affecting the boom

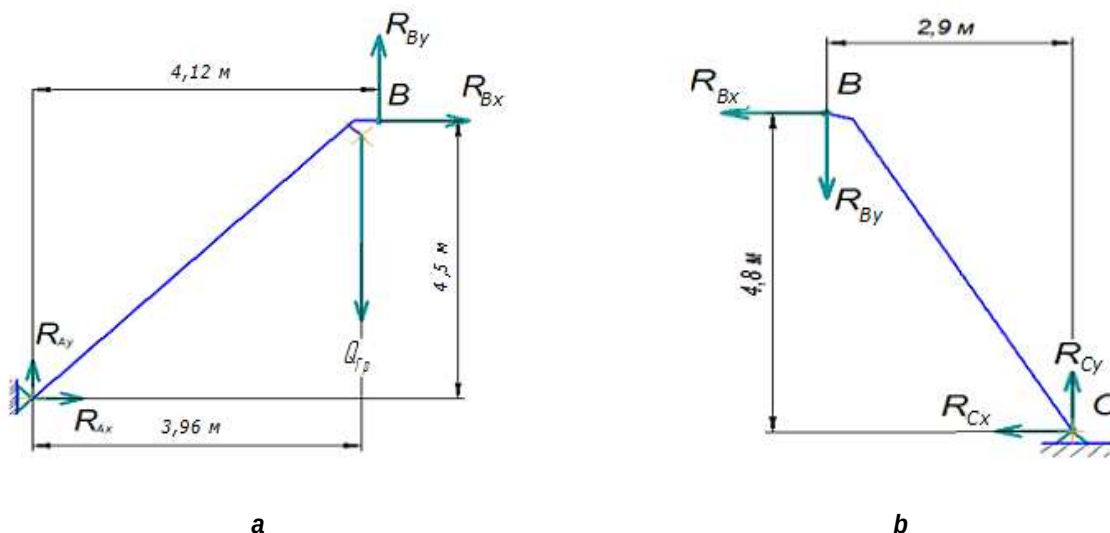


Рис. 4. А – левая часть конструкции; b – правая часть конструкции
Fig. 4. A – Left section of the structure; b – Right section of the structure

⁵Дудолодов Ю.А. Краны-трубоукладчики: учебник для проф.-тех. училищ; 3-е изд., перераб. и доп. М.: Высш. шк., 1981. 240 с. / Dudoladov Yu.A. Pipelayer cranes: a textbook for vocational schools. Moscow: Higher School Publ., 1981, 240 p.



$$\sum F_{iX} = R_{Ax} + R_{Bx} = 0; \quad (10)$$

$$\sum F_{iY} = R_{Ay} + R_{By} - Q_{zp} = 0; \quad (11)$$

$$\sum M_A = R_{By} \cdot 4,12 - R_{Bx} \cdot 4,5 - Q_{zp} \cdot 3,96 = 0. \quad (12)$$

Составлены уравнения равновесия сил:

- сумма сил относительно оси X;
- сумма сил относительно оси Y;
- сумма моментов относительно точки B;
- сумма моментов относительно точки C соответственно⁶ [8]:

$$\sum F_{iX} = -R_{Bx} - R_{Cx} = 0; \quad (13)$$

$$\sum F_{iY} = R_{Cy} - R_{By} = 0; \quad (14)$$

$$\sum M_C = R_{Bx} \cdot 4,8 + R_{By} \cdot 2,9 = 0; \quad (15)$$

$$\sum M_B = -R_{Cx} \cdot 4,8 + R_{Cy} \cdot 2,9 = 0. \quad (16)$$

Из формулы (13)

$$R_{Bx} = -R_{Cx}. \quad (17)$$

Из формулы (14)

$$R_{By} = R_{Cy}. \quad (18)$$

Из формулы (16)

$$R_{Cy} = \frac{R_{Cx} \cdot 4,8}{2,9}. \quad (19)$$

Подставив выражения (17) и (19) в формулу (12), получили реакцию R_{Cx} :

$$\frac{R_{Cx} \cdot 4,8}{2,9} \cdot 4,12 + R_{Cx} \cdot 4,5 - Q_{zp} \cdot 3,96 = 0. \quad (20)$$

Равнодействующая сила реакций R_{Bx} и R_{By} , возникающих в шарнире, равна алгебраической сумме этих сил:

$$R_B = \sqrt{R_{Bx}^2 + R_{By}^2}. \quad (21)$$

Изгибающий момент в оси шарнира рассчитан по формуле [8]

$$M_{II} = \frac{N \cdot a}{2}, \quad (22)$$

где N – поперечное изгибающее усилие, кН; a – расстояние от проушины до точки приложения усилия, см.

Минимальный момент сопротивления поперечного сечения оси найден как [9]

$$W_{II} = \frac{M_{II}}{m \cdot 0,1 \cdot R}, \quad (23)$$

где m – коэффициент условий работы; R – расчетное сопротивление круглой прокатной стали, МПа.

Диаметр оси был определен по формуле [10]

$$d = \sqrt[3]{10 \cdot W_{II}}. \quad (24)$$

Для дальнейшего расчета необходимо было проверить ось на срез. Для этого была использована формула [4, 11]:

$$\frac{N}{n_{cp} \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4}} < m \cdot R_{cp}, \quad (25)$$

где n_{cp} – число срезов оси, $n_{cp} = 2$;

R_{cp} – сопротивление срезу, МПа.

⁶Добронравов С.С., Добронравов М.С. Строительные машины и оборудование: справочник. М.: Высш. шк., 2006. 445 с. / Dobronravov S.S., Dobronravov M.S. Construction machinery and equipment: a handbook. Moscow: Higher School Publ., 2006, 445 p.



Результаты исследования и их обсуждение

В среде Solid Works произведены теоретические исследования, направленные на определение прочностных характеристик предложенной конструкции стрелы трубоукладчика⁷ [4].

Прочностные расчеты проводились в следующей последовательности [6]:

1. Был задан материал и определен тип крепления стрелы и гидроцилиндра стрелы (тип крепления стрелы и гидроцилиндра стрелы – зафиксированный шарнир, воздействие грунта на опору – зафиксированная геометрия).

2. Задана нагрузка, направленная вдоль каната вниз, за модель каната принята цилиндрическая фигура, установленная в проушины крепления крюковой обоймы, действующая сила направлена на поверхность данной фигуры с обратным направлением.

3. На твердом теле построена сетка, разбивающая модель на более малые

сегменты.

4. Произведены расчеты⁷.

На рис. 5 представлена визуализация теоретических исследований, направленных на определение напряжений, возникающих в конструкции: минимальные значения напряжения в конструкции равны 0,257 Па, максимальные – $2,63 \cdot 10^8$ Па.

Проведенные исследования позволили определить участки скопления максимальных напряжений в конструкции опоры при заданной нагрузке, равной 12 т⁷[12]. Исследования показали, что максимальные напряжения не превышают допустимого предела текучести материала [3].

На рис. 6 представлена визуализация теоретических исследований, направленных на определение перемещений в конструкции опоры стрелы трубоукладчика⁷ [9]. Исследования показали, что минимальные значения перемещения в конструкции равны 0 мм, максимальные – 4,62 мм.

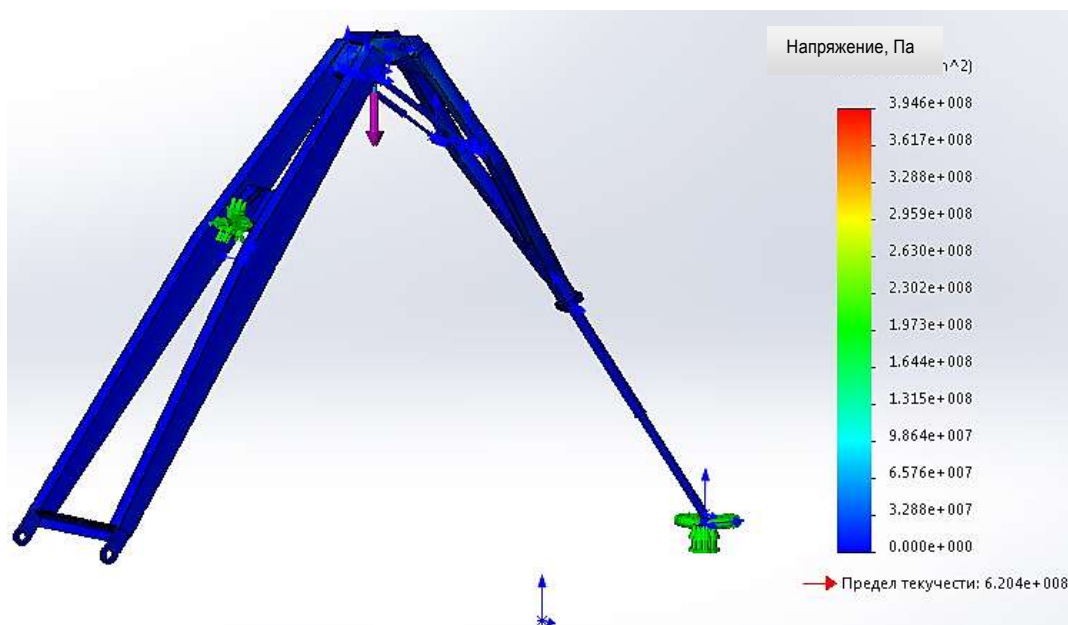


Рис. 5. Напряжения в конструкции опоры стрелы трубоукладчика
Fig. 5. Stresses in the pipelayer boom support structure

⁷Раннев А.В., Полосин М.Д. Устройство и эксплуатация дорожно-строительных машин: учебник. 4-е изд., стер. М.: Академия, 2008. 482 с. / Rannev A.V., Polosin M.D. Device and operation of road-building machinery: a textbook. Moscow: Academy Publ., 2008, 482 p.

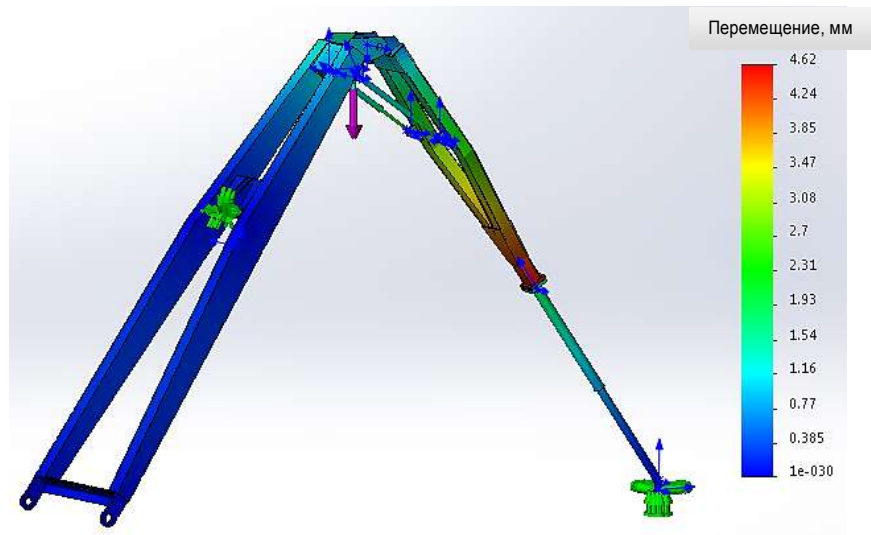


Рис. 6. Перемещения в конструкции опоры стрелы трубоукладчика
Fig. 6. Shifts in the pipelayer boom support structure

Теоретические исследования перемещений позволили определить места в конструкции опоры с возможными перемещениями деталей конструкции. Установлено, что максимальные перемещения сосредоточены в месте крепления дополнительной опоры к гидроцилиндру [9]. Предотвратить возможные перемещения в конструкции можно путем увеличения количества болтовых соединений, либо крепежных

элементов⁸.

На рис. 7 представлена визуализация теоретических исследований, направленных на определение величины деформации, возникающей в конструкции опоры стрелы трубоукладчика [4, 13]. При приложении нагрузки, равной 12 т, минимальная величина деформации в конструкции равна $1,93 \cdot 10^{-7}$ мм, максимальная – $5,8 \cdot 10^{-4}$ мм.

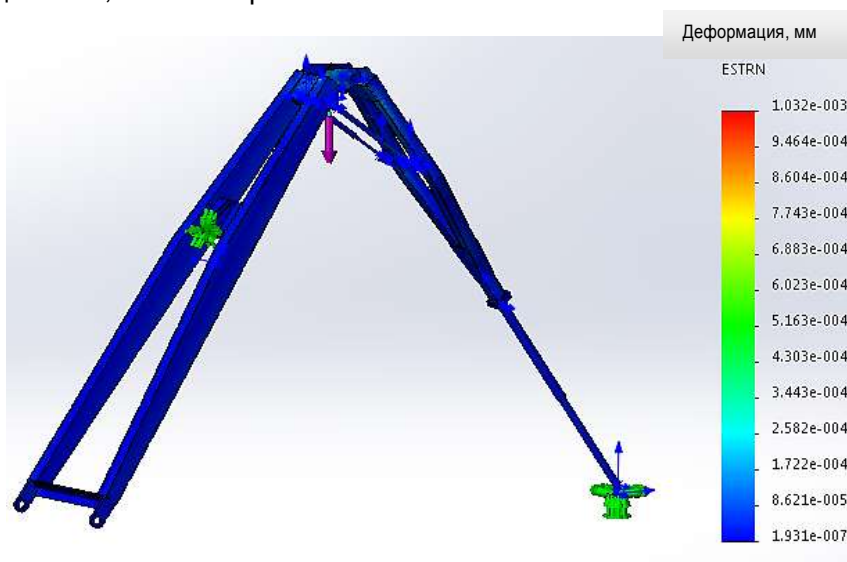


Рис. 7. Деформации в конструкции опоры стрелы трубоукладчика
Fig. 7. Deformations in the pipelayer boom support structure

⁸Минаев В.И. Машины для строительства магистральных трубопроводов: учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1985. 440 с. / Minaev V.I. Machinery for main pipelines construction: a textbook for higher schools. Moscow: Nedra Publ., 1985, 440 p.



Исследования, направленные на определение деформации, позволили определить места возможных деформаций предложенной конструкции опоры стрелы трубоукладчика. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что критических значений при моделировании возможной максимальной грузоподъемности в узлах оборудования не возникает [4].

На рис. 8 представлена визуализация теоретических исследований, направленных на определение запаса прочности в конструкции опоры стрелы трубоукладчика [4, 12]. Минимальный запас прочности – 1,6,

максимальный – 4,76.

Исследования запаса прочности позволили установить прочностные характеристики в каждой точке предложенной конструкции, а также определить, способна ли конструкция выдержать заданные нагрузки, характеризующиеся коэффициентом безопасности FOS. Для того чтобы нагрузка выдержала заданные нагрузки, коэффициент безопасности должен быть больше 1, в связи с чем детали в конструкции необходимо изготавливать с коэффициентом безопасности больше 1,5.

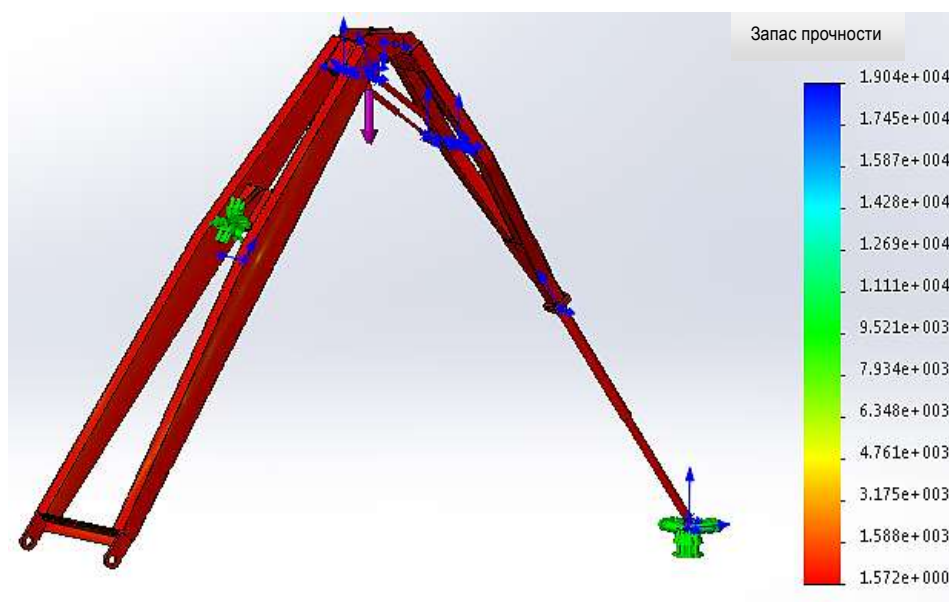


Рис. 8. Запас прочности в конструкции опоры стрелы трубоукладчика
Fig. 8. Safety factor in the pipelayer boom support structure

Заключение

В ходе проведения исследований были получены расчетные зависимости для определения сил, возникающих в узловых соединениях. Полученные формулы позволяют рассчитать зависимость нагрузок от массы укладываемой в траншею трубы. Установлено, что возникающие напряжения и перемещения в конструкции рабочего оборудования не превышают критических значений. Проведенный прочностный расчет позволяет сделать вывод о достаточ-

ном запасе прочности конструкции рабочего оборудования трубоукладчика.

Применение трубоукладчика с дополнительной опорой может уменьшить количество техники, используемой при укладке трубопровода. Предложенная конструкция опоры стрелы позволит увеличить плавность укладки трубы, повысить устойчивость трубоукладчика и значительно обезопасить процесс строительства трубопровода.



Библиографический список

1. Усанов В., Березин А., Воронцов А., Жуткин В., Бабаков Ю. Снижение затрат при эксплуатации кранов-трубоукладчиков // ТехНадзор. 2015. № 11 (108). С. 686–687.
2. Паршин Д.Я., Шошиашвили М.Э. Автоматический контроль устойчивости кранов-трубоукладчиков // Строительные и дорожные машины. 1990. № 10. С. 16–18.
3. Воронин А.Н., Липский В.К., Серенков П.С. Анализ аварийности магистрального трубопроводного транспорта в Республике Беларусь, Российской Федерации, странах Западной Европы и США // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. 2012. № 16. С. 69–74.
4. Воронин А.Н., Липский В.К. Описание сети процессов в магистральном трубопроводном транспорте с использованием системы функционального моделирования // Надежность и безопасность магистрального трубопроводного транспорта: сб. тезисов VIII Междунар. науч.-техн. конф. (Новополоцк, 25–28 ноября 2014 г.). Новополоцк: Изд-во УО «Полоцкий государственный университет» 2014. С. 49–51.
5. Ващук И.М., Уткин В.И., Харкун Б.И. Трубоукладчики. М.: Машиностроение, 1989. 180 с.
6. Летопольский А.Б., Семкин Д.С., Ковалев А.В. Расчет нагрузок в рабочем оборудовании строительной машины для укладки магистрального трубопровода в траншею // Техника и технологии строительства. 2016. № 2 (6). С. 11–15.
7. Korchagin P.A., Teterina I.A., Rahuba L.F. Improvement of human operator vibroprotection system in the

- utility machine // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 944. No. 1. P. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012059
8. Чернявский Д.И., Чернявская Д.Д. Определение оптимальных параметров формирования ударно-вращательного импульса при бурении бетона перфораторами // Омский научный вестник. 2015. № 1 (137). С. 44–46.
9. Denisova L., Meshcheryakov V. Synthesis of a control system using the genetic algorithms // IFAC-PapersOnLine. 2016. Vol. 49. No. 12. P. 156–161. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.567
10. Boyarkina I.V., Tarasov V.N. Regularities of the working equipment elements mass reduction to the hydraulic power cylinder piston for the bucket boom machines size standard // Journal of Physics: Conference Series. 2017. Vol. 858. No. 1. P. 012006. DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012006.
11. Корытов М.С., Щербаков В.С., Шершнева Е.О. Обоснование значений коэффициентов регуляторов гашения колебаний груза мостового крана // Вестник СибАДИ. 2017. № 1 (53). С. 12–19. DOI: 10.26518/2071-7296-2017-1(53)-12-19
12. Зарубин В.Н. Трубоукладчик. М.: Стройиздат, 1984. 40 с.
13. Пат. 703490 СССР, МПК В66С-23/42 Кран-трубоукладчик / Б.И. Харкун, О.В. Верейнов, В.И. Уткин, В.И. Шевеленко, В.И. Слисков, Б.З. Захарчук; заявитель и патентообладатель Всесоюзный научно-исследовательский институт строительного и дорожного машиностроения. 2562360/29-11; заявл. 02.01.78; опубл. 15.12.79. Бюл. № 46.

References

1. Usanov V., Berezin A., Vorontsov A., Zhutkin V., Babakov Yu. Cost reduction when operating of pipelayer cranes. *TekhNadzor* [Engineering Supervision]. 2015, no. 11 (108), pp. 686–687. (In Russian)
2. Parshin D.Ya., Shoshiashvili M.E. Automatic control of pipelayer crane stability. *Stroitel'nye i dorozhnye mashiny* [Construction and Road Building Machinery]. 1990, no. 10, pp. 16–18. (In Russian)
3. Voronin A.N., Lipskii V.K., Serenkov P.S. The analysis of accidental rate on the main pipeline transport in the Republic of Belarus, the Russian Federation, countries of Western Europe and the United States of America. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F: Stroitel'stvo. Prikladnye nauki* [Herald of Polotsk State University. Series F: Civil Engineering. Applied Sciences]. 2012, no. 16, pp. 69–74. (In Russian)
4. Voronin A.N., Lipskii V.K. *Opisanie seti protsessov v magistral'nom truboprovodnom transporte s ispol'zovaniem sistemy funktsional'nogo modelirovaniya* [Description of the network of processes in the main pipeline transport using the functional modeling sys-

- tem]. *Sbornik tezisev VIII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Nadezhnost' i bezopasnost' magistral'nogo truboprovodnogo transporta"* [Collection of abstracts of VIII International scientific and technical conference "Reliability and safety of the main pipeline transport"]. Novopolotsk: Polotsk state university Publ., 2014, pp. 49–51.
5. Vashchuk I.M., Utkin V.I., Kharkun B.I. *Truboukladchiki* [Pipelayers]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1989, 180 p. (In Russian)
6. Letopol'skii A.B., Semkin D.S., Kovalev A.V. Calculation of loadings in the working equipment of the construction car for laying of the main pipeline in the trench. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva* [Machinery and Construction Technologies]. 2016, no. 2 (6), pp. 11–15. (In Russian)
7. Korchagin P.A., Teterina I.A., Rahuba L.F. Improvement of human operator vibroprotection system in the utility machine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018, vol. 944, no. 1. P. 012059. DOI: 10.1088/1742-6596/944/1/012059
8. Chernyavskii D.I., Chernyavskaya D.D. Determina-



tion of optimal formation parameters of a shock-rotational momentum when drilling concrete by hammer drills. *Omskii nauchnyi vestnik* [Omsk Scientific Bulletin]. 2015, no. 1 (137), pp. 44–46. (In Russian)

9. Denisova L., Meshcheryakov V. Synthesis of a control system using the genetic algorithms. *IFAC-PapersOnLine*. 2016, vol. 49, no. 12, pp. 156–161. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.567

10. Boyarkina I.V., Tarasov V.N. Regularities of the working equipment elements mass reduction to the hydraulic power cylinder piston for the bucket boom machines size standard. *Journal of Physics: Conference Series*. 2017, vol. 858, no. 1. P. 012006.

Критерии авторства

Корчагин П.А., Летопольский А.Б., Тетерина И.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.

DOI: 10.1088/1742-6596/858/1/012006.

11. Korytov M.S., Shcherbakov B.C., Shershneva E.O. Justification of values factor controller vibration damping shipping bridge cranes. *Vestnik SibADI* [SibADI Bulletin]. 2017, no. 1 (53), pp. 12–19.

DOI: 10.26518/2071-7296-2017-1(53)-12-19. (In Russian)

12. Zarubin V.N. *Truboukladchik* [Pipelayer]. Moscow: Stroizdat Publ., 1984, 40 p. (In Russian)

13. Kharkun B.I., Vereinov O.V., Utkin V.I., Shevelenko V.I., Sliskov V.I., Zakharchuk B.Z. *Kran-truboukladchik* [Pipelayer crane]. Patent USSR, no. 703490, 1979.

Authorship criteria

Korchagin P.A., Letopolsky A.B., Teterina I.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.



ВЛИЯНИЕ ИЗНОСА РИСУНКА ПРОТЕКТОРА БЕГОВОЙ ДОРОЖКИ ШИНЫ НА ЕЕ СЦЕПНЫЕ СВОЙСТВА ПРИ ТОРМОЖЕНИИ НА СТЕНДЕ В БЛОКОВОМ РЕЖИМЕ

© А.И. Федотов¹, А.С. Марков²

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

РЕЗЮМЕ. ЦЕЛЬ. Провести экспериментальное исследование влияния износа рисунка протектора беговой дорожки шины на реализованный коэффициент сцепления с опорными поверхностями стенда при варьировании величины нормальной нагрузки. **МЕТОДЫ.** Исследования выполнялись на стенде модульной конструкции, позволяющем измерять нормальные и касательные реакции эластичной шины с опорными поверхностями. **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Установлено снижение коэффициента сцепления эластичной шины автомобильного колеса при торможении в блоковом режиме на плоской опорной поверхности на 35,3% при увеличении износа рисунка протектора от 10 до 90%. При торможении колеса на одном опорном ролике стенда и износе протектора от 10 до 90% снижение коэффициента сцепления составляет 18%. При торможении колеса на двух опорных роликах стенда снижение коэффициента сцепления составляет: 23,8% – на переднем ролике, 48,4% – на заднем опорном ролике стенда, при увеличении износа рисунка протектора от 10 до 70%. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** В результате проведенных экспериментальных исследований установлена зависимость коэффициента сцепления эластичной шины при торможении заблокированного колеса на плоской опорной поверхности и на одном или двух опорных роликах от степени износа рисунка его протектора и изменения нормальной нагрузки.

Ключевые слова: эластичная шина, беговая дорожка, коэффициент сцепления, продольные и касательные реакции, длина пятна контакта, износ рисунка протектора.

Информация о статье. Дата поступления 14 июня 2018 г.; дата принятия к печати 27 августа 2018 г.; дата онлайн-размещения 28 сентября 2018 г.

Формат цитирования. Федотов А.И., Марков А.С. Влияние износа рисунка протектора беговой дорожки шины на ее сцепные свойства при торможении на стенде в блоковом режиме // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 9. С. 205–213. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-205-213

EFFECT OF TIRE TREAD PATTERN WEAR ON TIRE GRIP UNDER TEST BENCH BRAKING IN A LOCKED MODE

A.I. Fedotov, A.S. Markov

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

ABSTRACT. The **PURPOSE** of the article is to carry out an experimental study of the effect of the tire tread pattern wear on the implemented coefficient of adhesion to the support surfaces of the test bench under the variation of normal load value. **METHODS.** The studies were performed on the test bench of modular design, which allows to measure the normal and tangential reactions of the elastic tire with support surfaces. **RESULTS.** It has been determined that the increase of the tire tread pattern wear from 10 to 90% reduces the adhesion coefficient of the automobile wheel elastic tire by 35.3% when braking in the locked mode on a flat support surface. When the wheel brakes on one support roller of the test bench and the tread wear is from 10% to 90% the adhesion coefficient reduces by 18%. When the wheel brakes on two

¹Федотов Александр Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автомобильного транспорта, e-mail: fai.abs@yandex.ru

Alexander I. Fedotov, Doctor of technical sciences, Professor, Head of the Department of Automobile Transport, e-mail: fai.abs@yandex.ru

²Марков Алексей Сергеевич, аспирант, e-mail: buran.005@mail.ru

Alexey S. Markov, Postgraduate student, e-mail: buran.005@mail.ru



support rollers of the test bench the coefficient of adhesion makes 23.8% on the front roller and 48.4% on the rear support roller of the stand, with an increase in the wear of the tread pattern from 10% to 70%. **CONCLUSION.** The conducted experimental studies allowed to determine the dependence of the adhesion coefficient of the elastic tire on the wear degree of the tire tread pattern and the variation of normal load under the locked wheel braking on the flat support surface and one or two support rollers.

Keywords: *elastic tire, tire tread, coefficient of adhesion, longitudinal and tangential reactions, contact patch length, tread pattern wear*

Information about the article. Received June 14, 2018; accepted for publication August 27, 2018; available online September 28, 2018.

For citation. Fedotov A.I., Markov A.S. Effect of tire tread pattern wear on tire grip under test bench braking in a locked mode. Proceedings of Irkutsk State Technical University. 2017, vol. 22, no. 9, pp. 205–213. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-9-205-213 (In Russian)

Введение

Ежегодно в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) гибнут десятки тысяч человек, что наносит значительный ущерб экономике страны. Около 10% от общего числа ДТП происходит по причине неисправности тормозной системы автотранспортных средств (АТС). Преобладающая часть ДТП сопровождается процессом торможения [1]. Качество технического состояния тормозной системы влияет на обеспечение тормозной эффективности и устойчивости при торможении АТС. Оценочными показателями эффективности рабочей тормозной системы в условиях дорожного контроля являются установившееся замедление и тормозной путь. Главным параметром этих показателей является коэффи-

ент сцепления.

В соответствии с требованиями технического регламента ТР ТС 018-2011³ в процессе проведения технического осмотра АТС проверяется остаточная высота рисунка протектора беговой дорожки шины. Для АТС категории М1 эта величина составляет 1,6 мм, для категории М2 – 2,0 мм, для категорий N1, N2, N3 – 0,8 мм. Однако в настоящее время в публикациях и научной литературе нет актуализированной информации о том, как изменяется коэффициент сцепления эластичной шины в процессе эксплуатации и как это сказывается на показателях тормозной эффективности АТС [2].

Описание методики проведения эксперимента

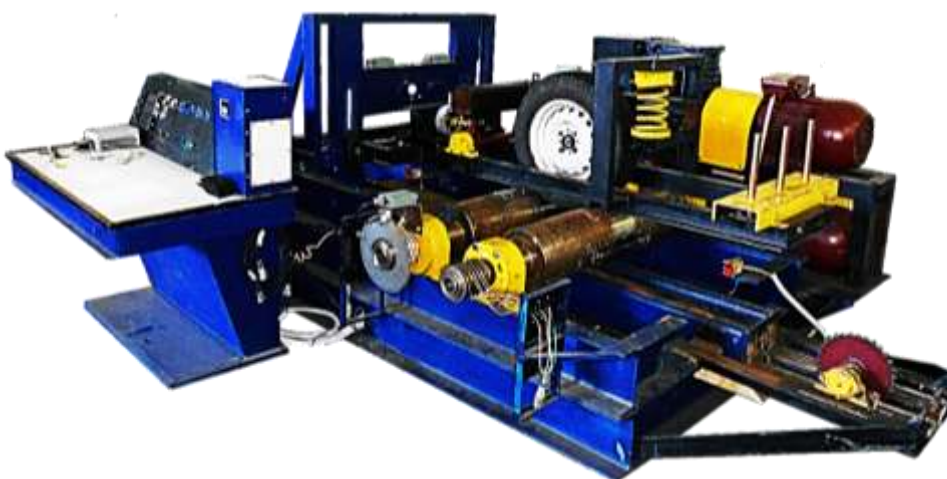
Для изучения данного вопроса в лаборатории кафедры «Автомобильный транспорт» Иркутского национального исследовательского технического университета (ИРНИТУ) группой ученых разработан стенд модульной конструкции, позволяющий изучать процессы, протекающие в пятне контакта эластичной шины с опорной поверхностью. При этом конструкция стен-

да позволяет исследовать процесс взаимодействия шин с одним или двумя опорными роликами и с плоской опорной поверхностью (рис. 1). Стенд оснащен системой измерения суммарной тормозной силы и системой измерения касательных и нормальных реакций, распределенных по длине пятна контакта эластичной шины с опорной поверхностью [3].

³ТР ТС 018-2011. О безопасности колесных транспортных средств: технический регламент Таможенного союза; утв. решением Комиссии Таможенного союза от 09.12.2011 г. № 677 / TR TS 018-2011. On the safety of wheeled vehicles: technical regulations of the Customs Union; approved by the decision of the Commission of the Customs Union of 9 December 2011 no. 677.



а



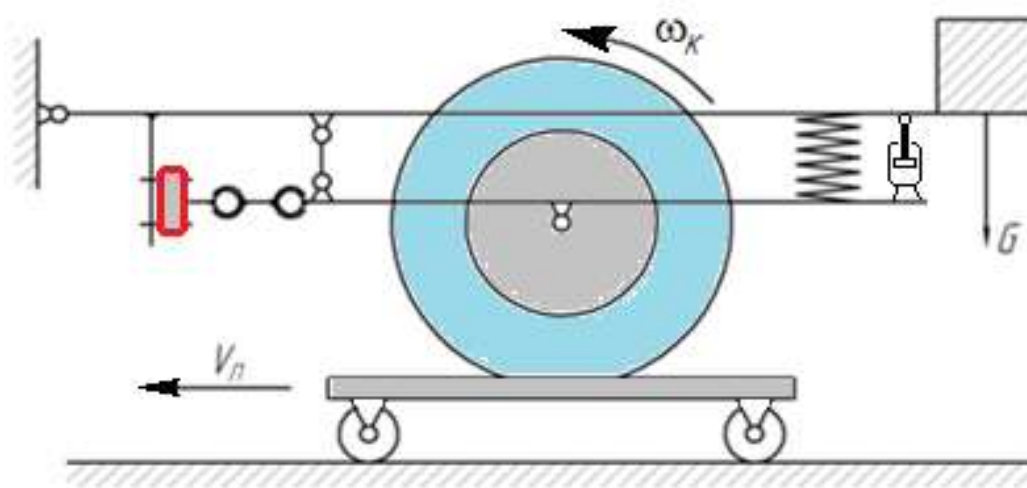
b

Рис. 1. Общий вид стенда модульного типа для исследований процессов в пятне контакта эластичной шины с плоской опорной поверхностью (а) и опорными роликами (b)
Fig. 1. General view of the modular type test bench to study the processes in the contact patch of an elastic tire with a flat support surface (a) and support rollers (b)

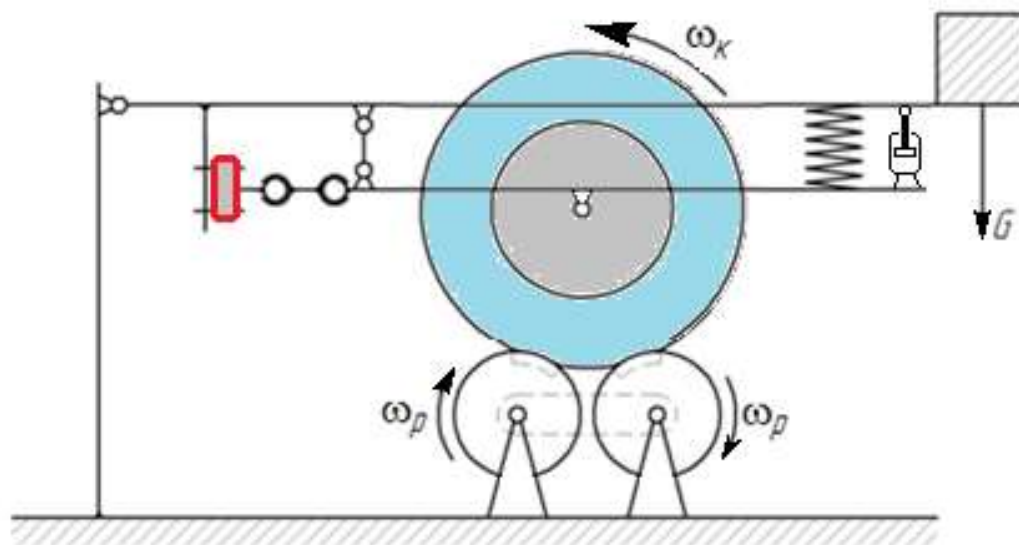
Кинематическая схема стенда представлена на рис. 2. Плоская опорная поверхность стенда (рис. 2, а) совершает линейное поступательное движение относительно жестко закрепленной шины со скоростью от 0 до 1,1 м/с. Колесо в сборе с эластичной шиной заблокировано и находится в неподвижном состоянии ($\omega_k = 0$ рад/с). В поверхность опорной площадки стенда вмонтирован тензометрический датчик, представляющий собой пластину с наклеенными на нее тензорезисторами. Датчик входит в состав системы измерения продольных и касательных реакций, рас-

пределенных по длине пятна контакта эластичной шины с плоской опорной поверхностью стенда [3, 4].

Кинематическая схема стенда для исследования процесса торможения эластичной шины на цилиндрических опорных роликах представлена на рис. 2, б. Конструкция стенда позволяет дискретно смещать колесо в продольном направлении относительно опорных роликов, что позволяет проводить исследования как на одном, так и на двух опорных роликах при размещении колеса со смещением относительно оси симметрии опорных роликов.



а



б

Рис. 2. Кинематическая схема стенда модульного типа для исследования процессов, протекающих в пятне контакта эластичной шины с плоской опорной поверхностью (а) и опорными роликами (б)

Fig. 2. Kinematic scheme of the modular type test bench for studying the processes occurring in the contact patch of the elastic tire with a flat support surface (a) and support rollers (b)

Привод стенда обеспечивает равномерное вращение роликов с угловой скоростью $\omega_p = 11$ рад/с. При этом колесо с эластичной шиной заблокировано и находится в неподвижном состоянии ($\omega_k = 0$ рад/с), что позволяет исследовать

процесс торможения заблокированного колеса. В поверхность каждого опорного ролика стенда вмонтированы тензометрические датчики, позволяющие измерять продольные и касательные реакции, распределенные по длине пятна контакта эла-



стичной шины с роликами стенда.

Исследования проводились с шинами марки BridgeStone Sneaker размером 185/75 R14 88S, отличающимися друг от друга величиной износа рисунка протектора беговой дорожки шины (рис. 3). В процессе исследования нагрузку на колесо дискретно изменяли в пределах от 1750 до

4750 Н, давление в шине поддерживали на уровне 0,21 МПа [5]. Для снижения влияния на процесс торможения изменяющейся температуры в пятне контакта трущихся тел, с учетом результатов, представленных в работе [4], между экспериментами выдерживалось время, необходимое для остывания опорной поверхности.



a



b

Рис. 3. Шины, используемые в экспериментальных исследованиях:

a – с износом 10%; b – с износом 90%

Fig. 3. Tires used in experimental studies:

a – with 10% wear; b – with 90% wear

Результаты исследований

Результаты исследования процесса торможения заблокированного колеса с эластичной шиной на плоской опорной поверхности стенда представлены на рис. 4.

Анализ полученных результатов показал, что с увеличением степени износа рисунка беговой дорожки протектора шины коэффициент ее сцепления с плоской опорной поверхностью снижается. Максимальное снижение коэффициента сцепления составило 35,3% при нагрузке 4750 Н.

Результаты торможения заблокированного колеса на одном опорном ролике стенда при изменении степени износа рисунка протектора и нормальной нагрузки представлены на рис. 5. Максимальное снижение коэффициента сцепления шины, имеющей износ 90%, по сравнению с ши-

ной, имеющей износ 10%, составило 18% при нагрузке 1750 Н.

На следующем этапе было проведено исследование изменения коэффициента сцепления шины тормозящего заблокированного колеса на поверхностях двух опорных роликов стенда (рис. 6).

Установлено, что снижение коэффициента сцепления для шины с износом 70% относительно шины, имеющей износ 10%, на переднем ролике стенда составило 23,8% при нормальной нагрузке на колесо 2250 Н. Для заднего опорного ролика максимальное снижение коэффициента сцепления при этой же степени износа рисунка протектора составило 48,4% при нагрузке на колесо 1750 Н.

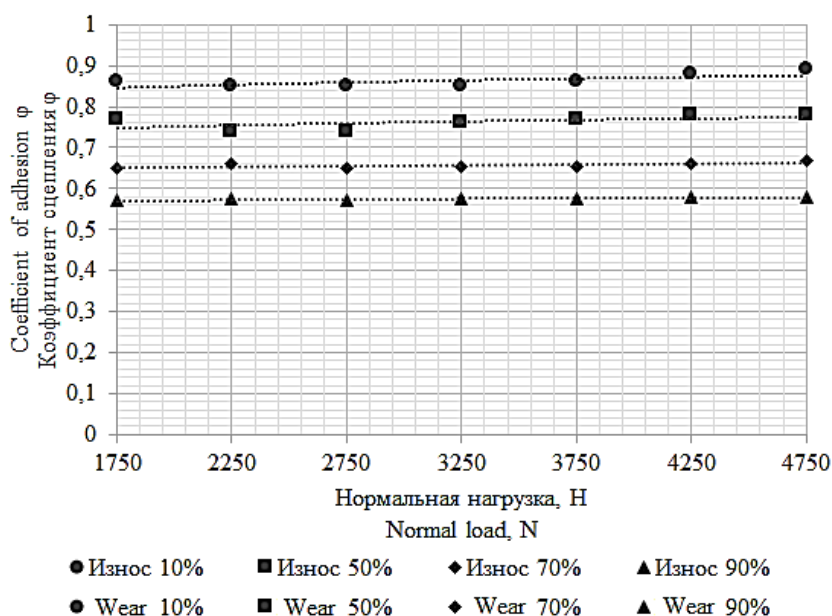


Рис. 4. Зависимость коэффициента сцепления шины BridgeStone Sneaker размером 185/75 R14 88S при торможении заблокированного колеса на плоской опорной поверхности от степени износа рисунка протектора и изменения нормальной нагрузки
Fig. 4. Dependence of the adhesion coefficient of the BridgeStone Sneaker tire of 185/75 R14 88S size under the locked wheel braking on a flat support surface on the wear pattern of the tread pattern and the normal load change

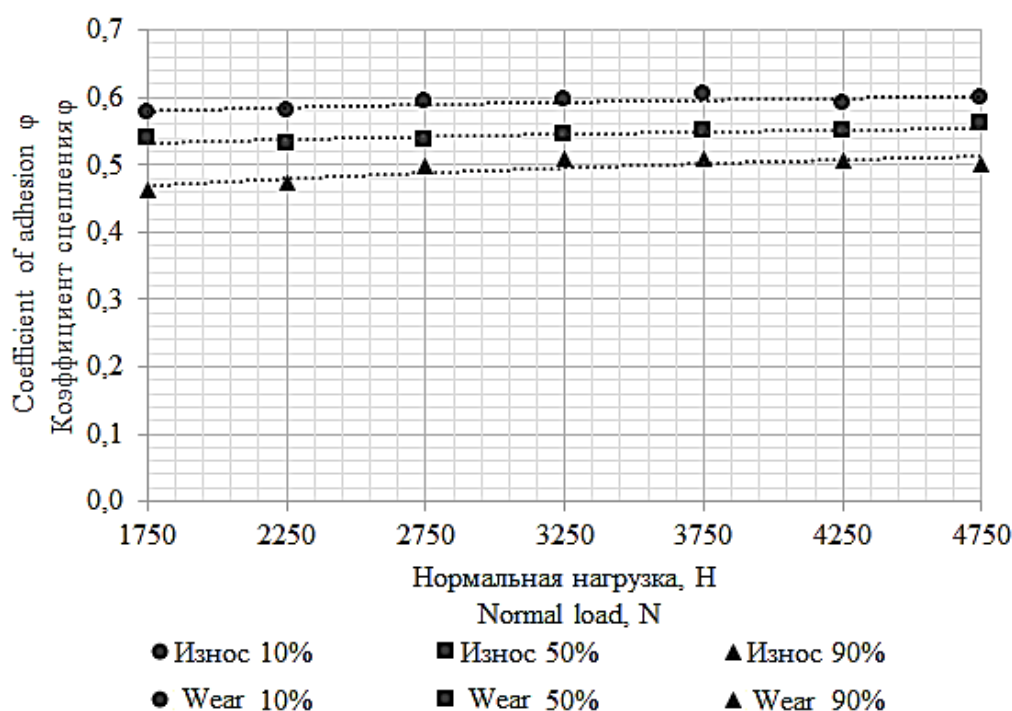


Рис. 5. Зависимость коэффициента сцепления шины BridgeStone Sneaker размером 185/75 R14 88S при торможении заблокированного колеса на одном опорном ролике стэнда от степени износа рисунка протектора и изменения нормальной нагрузки
Fig. 5. Dependence of the adhesion coefficient of the BridgeStone Sneaker tire of 185/75 R14 88S size under the locked wheel braking on one cylindrical support surface of the test bench on the wear degree of the tread pattern and the normal load change

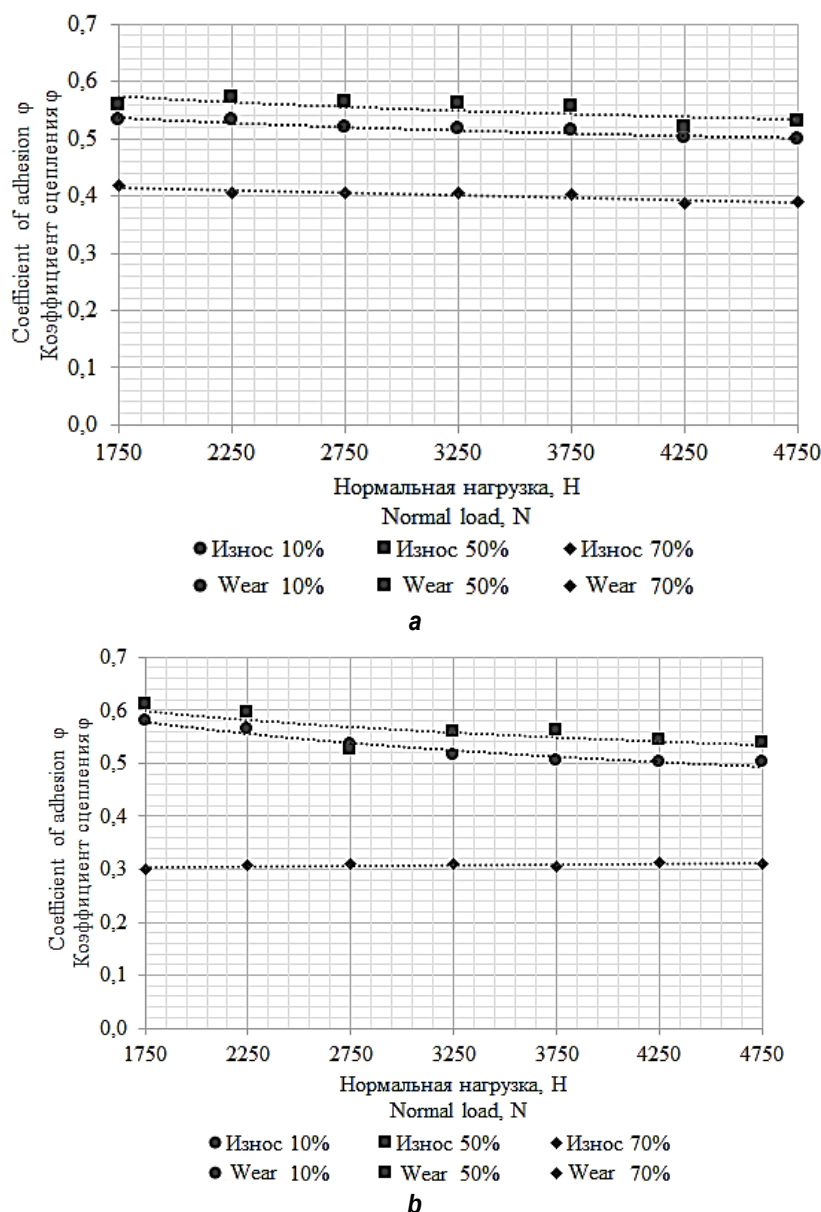


Рис. 6. Зависимость коэффициента сцепления шины BridgeStone Sneaker размером 185/75 R14 88S при торможении заблокированного колеса на двух опорных роликах от степени износа рисунка протектора и изменения нормальной нагрузки:

а – на переднем опорном ролике; б – на заднем опорном ролике

Fig. 6. Dependence of the adhesion coefficient of the BridgeStone Sneaker tire of 185/75 R14 88S size under the locked wheel braking on two cylindrical support surfaces on the wear degree of the tread pattern and the normal load change

Заключение

Таким образом, в результате исследования установлено, что изменение нормальной нагрузки оказывает относительно малое влияние на величину коэффициента сцепления эластичной шины как с плоской опорной поверхностью, так и с цилиндрическими опорными роликами.

Результаты проведенных исследований показали, что степень износа рисун-

ка протектора эластичной шины заблокированного тормозящего колеса значительно влияет на коэффициент сцепления этой шины с опорной поверхностью. При большем износе шины ее коэффициент сцепления с опорной поверхностью снижается. Этот результат коррелирует с результатами, полученными ранее, и гармонично их дополняет [4–7].



Автомобильная шина заблокированного колеса нестабильна к созданию продольных касательных реакций, и величина коэффициента сцепления носит стохастический характер [8, 9].

При торможении заблокированного колеса с эластичной шиной на плоской опорной поверхности увеличение степени износа рисунка его протектора от 10 до 90% приводит к снижению коэффициента сцепления на 35,3%.

При торможении заблокированного колеса с эластичной шиной на одном опорном ролике увеличение степени износа рисунка его протектора от 10 до 90% приводит к снижению коэффициента сцепления на 18%.

При торможении заблокированного колеса с эластичной шиной на двух опорных роликах увеличение степени износа

рисунка его протектора от 10 до 70% приводит к снижению коэффициента сцепления: на 23,8% – на переднем опорном ролике, и на 48,4% – на заднем опорном ролике.

Полученные результаты следует проверить на корреляцию с параметрами процесса торможения автомобиля в дорожных условиях, так как в этом случае происходит изменение нормальных реакций в результате перераспределения подрессоренной массы между передней и задней его осями. Более того, торможение автомобиля происходит на асфальтобетонном покрытии, в то время как на стенде колесо с эластичной шиной взаимодействует со стальными опорными поверхностями. Также в дорожных условиях оказывают влияние погодные условия, качество асфальтобетонного покрытия и др. [10–13].

Библиографический список

1. Показатели состояния безопасности дорожного движения [Электронный ресурс] // Госавтоинспекция. URL: <http://stat.gibdd.ru/> (25.04.2018).
2. Петров М.А. Работа автомобильного колеса в тормозном режиме. Омск: Зап.-Сиб. кн. изд-во, 1973. 224 с.
3. Бойко А.В., Янков О.С., Марков А.С., Кузнецов Н.Ю. Стенд для исследования процесса взаимодействия эластичной шины с двумя беговыми барабанами // Автомобиль для Сибири и Крайнего Севера: конструкция, эксплуатация, экономика: материалы 90-й Междунар. науч.-техн. конф. (Иркутск, 9–10 апреля 2015 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015. С. 115–123.
4. Федотов А.И., Марков А.С., Янков О.С., Овчинникова Н.И. Влияние износа рисунка протектора беговой дорожки шины на характеристики ее сцепления с опорной поверхностью // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. № 11. С. 216–225. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-11-216-225
5. Исаев Е.У., Соломатин Н.С., Ковтун В.В., Карпов В.М. Этапы разработки легкового автомобиля. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2005. 82 с.
6. Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Ovchinnikova N.I. Experimental studies of breaking of elastic tired wheel under variable normal load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Saint-Petersburg, 23–24 March 2017). Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing. 2017. Vol. 87. Doi: 10.1088/1755-1315/87/8/082019
7. Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Ovchinnikova N.I. Dynamic analysis of elastic rubber tired car wheel breaking under variable normal load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. (Saint-Petersburg, 23–24 March 2017). Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing. 2017. Vol. 87. Doi: 10.1088/1755-1315/87/8/082017
8. Иларионов В.А., Пчелин И.К. Реакции дороги, действующие на тормозящее колесо автомобиля // Исследование торможения автомобиля и работы пневматических шин: межвуз. сб. Омск: ОмПИ, 1979. С. 3–18.
9. Замешаев Н.С., Озорнин С.П. Результаты оценки величины коэффициента сцепления колес автотранспортных средств категории М1 с поверхностью дорожного покрытия при различных его состояниях // Автомобиль для Сибири и Крайнего Севера: конструкция, эксплуатация, экономика: материалы 90-й Междунар. науч.-техн. конф. (Иркутск, 9–10 апреля 2015 г.). Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2015. С. 88–94.
10. Евтюков С.А. Влияние факторов на сцепные качества покрытий автомобильных дорог // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6099> (25.04.2018).
11. Пилушина Г.А., Звонников П.В. Влияние условий эксплуатации автомобильных шин на коэффициент сцепления // Новые материалы и технологии в машиностроении. 2015. № 21. С. 83–86.
12. Ботвинева Н.Ю., Буракова И.С., Стрельцова Т.Н., Нестерчук А.В. Исследование влияния погодных условий на величину коэффициента сцепления шин с дорожным покрытием // Фундаментальные исследования. 2013. № 11-3. С. 407–411.
13. Гергенов С.М., Корчагин В.А., Дарханов Ж.В. Исследования сцепных свойств автомобильных шин // Ползуновский альманах. 2015. № 2. С. 91–95.



References

1. Pokazateli sostoyaniya bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Indicators of the road safety state]. Available at: <http://stat.gibdd.ru/> (accessed 25 April 2018).
2. Petrov M.A. *Rabota avtomobil'nogo koleasa v tormoznom rezhime* [Vehicle wheel operation in braking mode]. Omsk: West-Siberian Publishing house, 1973, 224 p. (In Russian)
3. Boiko A.V., Yan'kov O.S., Markov A.S., Kuznetsov N.Yu. *Stend dlya issledovaniya protsessy vzaimodeystviya elastichnoi shiny s dvumya begovymi barabanami* [Test bench for studying elastic tire interaction with two chassis dynamometers]. *Materialy 90-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Avtomobil" dlya Sibiri i Krainego Cevera: konstruktziya, ekspluatatsiya, ekonomika* [Materials of 90th International scientific and technical conference "Automobiles for Siberia and Far North: Design, Operation, Economy"]. Irkutsk: ISTU Publ., 2015, pp. 115–123. (In Russian)
4. Fedotov A.I., Markov A.S., Yan'kov O.S., Ovchinnikova N.I. Effect of tread pattern wear on characteristics of tire adhesion with a supporting surface. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University]. 2017, vol. 21, no. 11, pp. 216–225. DOI: 10.21285/1814-3520-2017-11-216-225. (In Russian)
5. Isaev E.U., Solomatin N.S., Kovtun V.V., Karpov V.M. *Etapy razrabotki legkovogo avtomobilya* [Vehicle development stages]. Togliatti: Togliatti state university Publ., 2005, 82 p. (In Russian)
6. Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Ovchinnikova N.I. Experimental studies of breaking of elastic tired wheel under variable normal load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Saint-Petersburg, 23–24 March 2017). Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing. 2017. Vol. 87. Doi:10.1088/1755-1315/87/8/082019
7. Fedotov A.I., Zedgenizov V.G., Ovchinnikova N.I. Dynamic analysis of elastic rubber tired car wheel breaking under variable normal load // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. (Saint-Petersburg, 23–24 March 2017). Saint-Petersburg: Institute of Physics Publishing. 2017. Vol. 87. Doi:10.1088/1755-1315/87/8/082017
8. Ilarionov V.A., Pchelin I.K. *Reaktsii dorogi, deistvuyushchie na tormozyashchee koleso avtomobilya* [Road reactions acting on the vehicle braking wheel]. *Mezhvuzovskii sbornik "Issledovanie tormozheniya avtomobilya i raboty pnevmaticheskikh shin"* [Interuniversity collection of articles "Research of vehicle braking and pneumatic tire operation"]. Omsk: Omsk polytechnic institute Publ., 1979, pp. 3–18. (In Russian)
9. Zameshaev N.S., Ozornin S.P. *Rezultaty otsenki velichiny koeffitsienta stsepleniya koles avtotransportnykh sredstv kategorii M1 s poverkhnost'yu dorozhnogo pokrytiya pri razlichnykh ego sostoyaniyakh* [Estimation results of the adhesion coefficient value of wheels of M1 category motor vehicles with a road surface at its various conditions]. *Materialy 90-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Avtomobil" dlya Sibiri i Krainego Cevera: konstruktziya, ekspluatatsiya, ekonomika* [Materials of 90th International scientific and technical conference "Automobiles for Siberia and Far North: Design, Operation, Economy"]. Irkutsk: ISTU Publ., 2015, pp. 88–94. (In Russian)
10. Evtyukov S.A. *Vliyanie faktorov na stepnye kachestva pokrytii avtomobil'nykh dorog* [Influence of factors on adhesion qualities of highway coverings]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2012, no. 3. Available at: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6099> (accessed 25 April 2018).
11. Pilyushina G.A., Zvonnikov P.V. Influence of conditions of operation of automobile tires on coupling factor. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii* [New Materials and Technologies in Mechanical Engineering]. 2015, no. 21, pp. 83–86. (In Russian)
12. Botvineva N.Yu., Burakova I.S., Strel'tsova T.N., Nesterchuk A.V. Research of weather conditions effect on the coefficient of coupling between tire and coverings of highways. *Fundamental'nye issledovaniya* [Modern Problems of Science and Education]. 2013, no. 11-3, pp. 407–411.
13. Gergenov S.M., Korchagin V.A., Darkhanov Zh.V. Study of coupling properties of tires // *Polzunovskii al'manakh* [Polzunov's almanakh]. 2015, no. 2, pp. 91–95.

Критерии авторства

Федотов А.И., Марков А.С. изучили влияние износа рисунка протектора беговой дорожки шины на ее сцепные свойства при торможении на стенде в блоковом режиме, провели обобщение и написали рукопись. Федотов А.И., Марков А.С. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authorship criteria

Fedotov A.I., Markov A.S. have studied the effect of tire tread pattern wear on adhesion properties under braking on the test bench in the block mode, generalized the material and wrote the manuscript. Fedotov A.I., Markov A.S. have equal authors' rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

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

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
№ 9 (140) 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 28.09.2018 г. Формат 60х90/8.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 27,4.
Тираж 500 экз. Заказ 254. Поз. плана 3н.

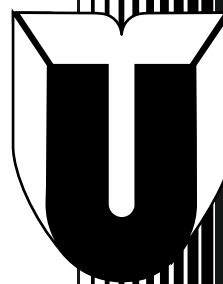
Издание распространяется **бесплатно**

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

