

Том 23 № 3

2019

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

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

12+





МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019

Том 23 № 3

2019

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Том 23 № 3

2019

## Редакционная коллегия

Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета

Журнал основан в 1997 г.

Периодичность издания –  
6 раз в годЖурнал 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  
университетПодписной индекс в Каталоге  
русской прессы – 38237Адрес учредителя, издателя:  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.Адрес редакции:  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83,  
ауд. Д-215, e-mail: pgp@istu.edu

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 3  
2019

Publishers of Irkutsk National Research Technical University

## Editorial board

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

The Journal was founded in 1997  
 Frequency of publication – 6 times a year  
 The journal is registered with the Federal Agency for Supervision of Communications, Information Technologies and Mass Media (Roskomnadzor).

Certificate of registration

№ ПИ № ФЧ77-62813

of 18 August, 2015.

Founder: Irkutsk National Research Technical University

Subscription index in the Catalog  
 of the Russian Press – 38237

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

|                  |     |
|------------------|-----|
| Содержание ..... | 430 |
|------------------|-----|



### Машиностроение и машиноведение

|                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Балла О.М.</b> Особенности проектирования торцовых фрез с переменными схемами резания, оснащенными неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов..... | 434 |
| <b>Дунаев А.М., Дунаев М.П.</b> Автоматизированная система научных исследований технологического процесса сушки древесины.....                                                                                    | 443 |
| <b>Ильиных В.А., Ярилов В.Е., Рожкова Е.А.</b> Оценка точности и прочности модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений.....                                                    | 451 |
| <b>Ларченко А.Г.</b> Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения.....                                                                                                         | 463 |
| <b>Рыжиков И.Н., Еловенко Д.А., Байроу Б.</b> Разработка математических моделей для анализа чувствительности колебаний деталей машин.....                                                                         | 472 |
| <b>Чепчуров М.С., Жуков Е.М.</b> Выбор конструкции и материала ударника или ещё раз об использовании пакетов метода конечных элементов в инженерии.....                                                           | 481 |



### Энергетика

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Абдулина Е.Р.</b> Методические подходы к оценке эффективности перевода дизельных электростанций на альтернативные виды топлива.....                                                                         | 492 |
| <b>Алексеев В.Э., Максимов А.С., Сафронов П.Г.</b> Усовершенствованная методика идентификации математических моделей теплоэнергетического оборудования.....                                                    | 503 |
| <b>Будякова Н.В., Крюков А.В., Степанов А.Д.</b> Моделирование условий электромагнитной безопасности на железнодорожных станциях.....                                                                          | 516 |
| <b>Волчек Т.В., Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О.</b> Анализ способов и технических средств систем ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов постоянного и переменного тока..... | 531 |
| <b>Калинич И.В., Кулагин В.А.</b> Экспериментальное исследование теплообмена нагретых материалов при конвейерной транспортировке.....                                                                          | 543 |
| <b>Новожилов М.А., Пионкевич В.А.</b> Разработка и исследование математических моделей трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов.....                                                                      | 553 |
| <b>Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Рахимбердинова Д.М., Кропотин О.В., Ткаченко В.А., Бигун А.Я.</b> Моделирование работы однофазного печного трансформатора с одинаковыми вторичными обмотками.....           | 575 |
| <b>Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Муzychuk С.Ю., Муzychuk Р.И.</b> Роль затрат на технологические инновации в росте энергоэффективности восточных регионов России.....                                             | 582 |



### Металлургия и материаловедение

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Исагулов А.З., Ибатов М.К., Квон Св.С., Ковалёва Т.В., Аринова С.К., Достаева А.М.</b> Влияние пористости на прочность огнеупорных изделий.....                                                  | 594 |
| <b>Исса Б., Бажин В.Ю., Теляков Н.М., Теляков А.Н.</b> Повышение коррозионной стойкости сварных радиантных и конвекционных змеевиков в трубчатых печах на нефтеперерабатывающем заводе «КИНЕФ»..... | 602 |
| <b>Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю., Григорьев В.Г., Касим А.М.</b> Расчёт нагрева стального стержня, используемого при рафинировании технического алюминия.....                                         | 617 |
| <b>Савченков С.А., Уголков В.Л.</b> Синтез магниевых лигатур при металлургическом восстановлении соединений редкоземельных металлов.....                                                            | 628 |

# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

Vol. 23 No. 3

2019

## CONTENTS

|               |     |
|---------------|-----|
| Contents..... | 431 |
|---------------|-----|



### Mechanical Engineering and Machine Science

|                                                                                                                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ❁ Balla O.M. Design features of face milling cutters with variable cutting patterns equipped with disposable hard alloy inserts for machining of parts made of hard-to-machine materials..... | 434 |
| ❁ Dunaev A.M., Dunaev M.P. Automated system of scientific studies of the technological process of wood drying.....                                                                            | 443 |
| ❁ Ilinykh V.A., Yarilov V.E., Rozhkova E.A. Assessment of auxiliary tool modular system accuracy and durability on the basis of profile joints.....                                           | 451 |
| ❁ Larchenko A.G. Quality assessment of products from polymeric materials designed for engineering purposes.....                                                                               | 463 |
| ❁ Ryzhikov I.N., Elovenko D.A., Beirow B. Development of mathematical models for sensitivity analysis of machine part vibrations.....                                                         | 472 |
| ❁ Chepchurov M.S., Zhukov E.M. Choosing striker design and material or again on the use of finite element method packages in engineering.....                                                 | 481 |



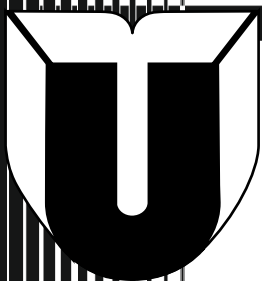
### Power Engineering

|                                                                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ❁ Abdulina E.R. Methodological approaches to efficiency estimation of diesel electric power station switch to alternative fuel types.....                                                           | 492 |
| ❁ Alekseyuk V.E., Maksimov A.S., Safronov P.G. Improved identification methods for thermal power equipment mathematical models.....                                                                 | 503 |
| ❁ Buyakova N.V., Kryukov A.V., Stepanov A.D. Modeling electromagnetic safety conditions at railway stations.....                                                                                    | 516 |
| ❁ Volchek T.V., Melnichenko O.V., Shramko S.G., Linkov A.O. Analysis of methods and technical equipment of traction motor field attenuation systems for AC and DC electric locomotives.....         | 531 |
| ❁ Kalinich I.V., Kulagin V.A. Experimental research of heated materials heat exchange at conveyor transportation.....                                                                               | 543 |
| ❁ Novozhilov M.A., Pionkevich V.A. Development and study of mathematical models of three-phase bridge rectifiers and inverters.....                                                                 | 553 |
| ❁ Novozhilov T.A., Novozhilov A.N., Rakhimberdinova D.M., Kropotin O.V., Tkachenko V.A., Bigun A.I. Modeling operation of a single-phase furnace transformer with identical secondary windings..... | 575 |
| ❁ Saneev B.G., Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Muzychuk R.I. The role of technological innovation costs in energy efficiency growth in Eastern regions of Russia.....                                 | 582 |



### Metallurgy and Materials Science

|                                                                                                                                                                              |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| ❁ Isagulov A.Z., Ibatov M.K., Kvon S.S., Kovaleva T.V., Arinova S.K., Dostaeva A.M. Porosity effect on refractory product strength.....                                      | 594 |
| ❁ Issa B., Bazhin V.Yu., Telyakov N.M., Telyakov A.N. Improving corrosion resistance of welded radiant and convection coiled-pipes in pipe stills at Kinef oil refinery..... | 602 |
| ❁ Kuzmin M.P., Kuzmina M.Yu., Grigoriev V.G., Qasim A.M. Calculation of heating of a steel rod used in technical aluminum refining.....                                      | 617 |
| ❁ Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. Synthesis of magnesium master alloys under metallothermic reduction of rare earth metal compounds.....                                       | 628 |



# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

## Уважаемые читатели!

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

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

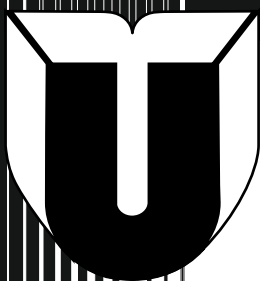
«Вестник ИргТУ» включен в международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», в базу данных EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в электронной библиотеке «Cyberleninka», библиотеке Oxford, Directory of Open Access Journals (DOAJ) рассылается в Российскую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

«Вестник ИргТУ» реферируется и рецензируется.

Приглашаем вас к активному творческому сотрудничеству по научным направлениям:

- Машиностроение и машиноведение
- Энергетика
- Металлургия и материаловедение

Редколлегия



# PROCEEDINGS

of Irkutsk State Technical University

## Dear Readers!

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

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

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

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

- Mechanical Engineering and Machine Science
- Power Engineering
- Metallurgy and Materials Science

**Editorial Board**





Оригинальная статья / Original article

УДК 621.9.02

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-434-442>

## Особенности проектирования торцовых фрез с переменными схемами резания, оснащенными неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов

© О.М. Балла

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

**Резюме:** Целью работы является повышение эффективности механической обработки деталей из труднообрабатываемых материалов путем применения специальных конструкций торцовых фрез с переменными схемами резания. В ходе работы применялись экспериментальные и теоретические методы исследования повышения работоспособности необходимых конструкций торцовых фрез с неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов для обработки труднообрабатываемых материалов на стадии их проектирования. Разработана методика проектирования специальных конструкций торцовых фрез с неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов для фрезерования труднообрабатываемых материалов как для черновой, так и чистовой обработки. Использование расчетных методов позволяет исключить влияние субъективных факторов на качество проектирования и снижает его трудоемкость. Применение необходимых торцовых фрез с неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов, работающих с обратными стружками, повышает эффективность как черновой, так и чистовой механической обработки деталей из труднообрабатываемых материалов, и, как показали результаты лабораторных и производственных испытаний, обеспечивает интенсификацию съема металла от 2 до 10 раз. В ряде случаев они являются единственно возможным вариантом обработки в производственных условиях.

**Ключевые слова:** торцовые фрезы, неперетачиваемые пластинки твердого сплава, схема резания, труднообрабатываемые материалы, проектирование

**Информация о статье:** Дата поступления 27 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 18 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Балла О.М. Особенности проектирования торцовых фрез с переменными схемами резания, оснащенными неперетачиваемыми пластинками твердых сплавов для обработки деталей из труднообрабатываемых материалов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):434–442. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-434-442

## Design features of face milling cutters with variable cutting patterns equipped with disposable hard alloy inserts for machining of parts made of hard-to-machine materials

Oleg M. Balla

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the paper is to improve the efficiency of mechanical processing of parts from hard-to-machine materials by using special designs of face mills with variable cutting patterns. The study uses experimental and theoretical research methods of improving the performance of required designs of face mills with disposable hard alloy inserts for the processing of hard-to-machine materials at their design stage. The method of designing special constructions of face mills with disposable hard alloy inserts for milling of hard-to-machine materials for both rough and finishing machining has been developed. The use of computational methods allows to eliminate the influence of subjective factors on design quality and reduces design complexity. The use of special face mills with disposable hard alloy inserts operating with reverse shavings increases the efficiency of both rough and finishing machining of parts from hard-to-machine materials and from 2 to 10 times intensifies metal removal as it was proved by the results of laboratory and production testing. In some cases they are the only possible machining option in production conditions.

**Keywords:** face mills, disposable hard alloy inserts, cutting pattern, hard-to-machine materials, designing

**Information about the article:** Received February 27, 2019; accepted for publication May 18, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Balla O.M. Design features of face milling cutters with variable cutting patterns equipped with disposable hard alloy inserts for machining of parts made of hard-to-machine materials. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):434–442. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-434-442

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для ряда отраслей фрезерование является преобладающим по трудоемкости механической обработки [1, 2]. С учетом широкого применения деталей из труднообрабатываемых материалов повышение эффективности фрезерования деталей является актуальной задачей. В данной работе рассмотрены вопросы интенсификации режимов фрезерования на стадии проектирования специальных торцовых фрез с переменными схемами резания.

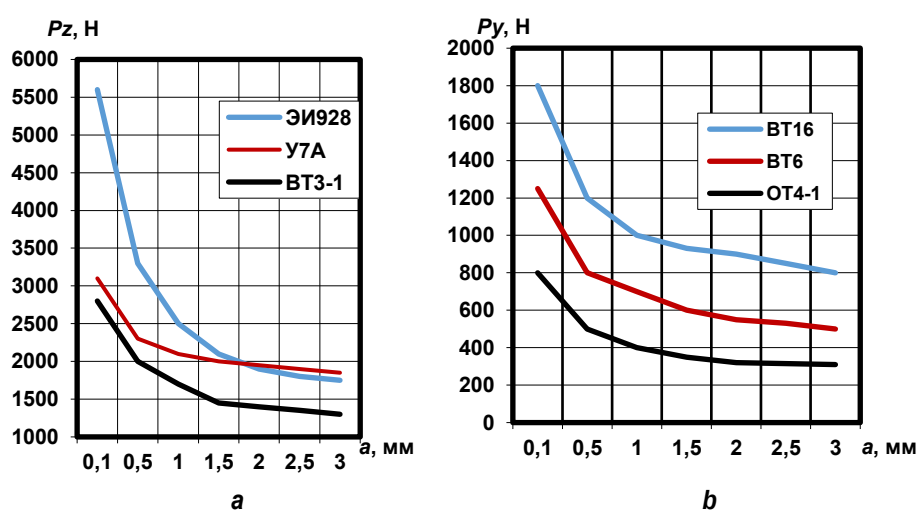
## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Известно, что влияние толщины среза на силы резания значительно меньше ширины среза [3], в работах [4–6] теоретически и экспериментально обоснована возможность управления силами резания за счет изменения формы поперечного сече-

ния среза при сохранении объема удаляемого материала. В работах [7–10] обосновано повышение работоспособности твердосплавных пластин с тангенциальным расположением. Наибольший эффект при этом имеет место при переходе от срезания прямых стружек к обратным, т. е. когда толщина среза превышает ширину. Эффект от срезания обратных стружек возрастает по мере снижения обрабатываемости материалов, рис. 1.

Экспериментальные работы были выполнены при условии сохранения постоянной площади поперечного сечения среза, где  $a$  – толщина среза;  $b$  – ширина среза;  $P_z$ ,  $P_y$  – составляющие сил резания.

Для реализации переменных схем резания целесообразно применять теорию винтовых поверхностей [11–14]. Наиболее просто данная схема резания может быть реализована в конструкциях торцовых фрез. Схема расположения пластин в плане по спирали Архимеда приведена на рис. 2, а расположение пластин в корпусах по высоте – на рис. 3.



**Рис. 1. Зависимость силы резания  $P_z$  при точении (а) и  $P_y$  при фрезеровании (б) от формы поперечного сечения среза ( $a \times b = 0,75 \text{ мм}^2$ )**

**Fig. 1. Dependence of the cutting force  $P_z$  at turning (a) and  $P_y$  at milling (b) on the shape of the cut cross-section ( $a \times b = 0.75 \text{ mm}^2$ )**

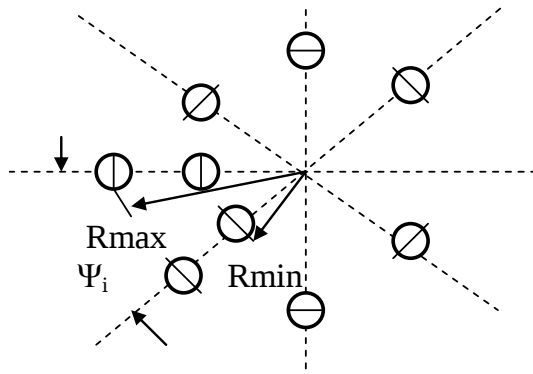


Рис. 2. Схема расположения пластин в корпусах фрез в плане:  $R_{min}$  – радиус расположения 1<sup>й</sup> пластинки;  $R_{max}$  – радиус расположения последней пластинки;  $\Psi_i$  – окружной шаг расположения пластин

Fig. 2. Diagram of plate arrangement in mill cases in the plan:  $R_{min}$  – location radius of the 1<sup>st</sup> plate;  $R_{max}$  – location radius of the last plate;  $\Psi_i$  – circumferential pitch of plate arrangement

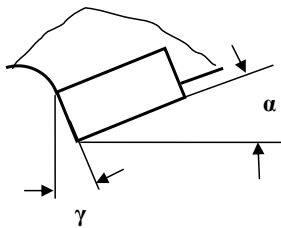


Рис. 3. Схема расположения пластин в корпусах фрез:  $\gamma$  – передний угол;  $\alpha$  – задний угол  
Fig. 3. Diagram of plate arrangement in mill cases:  $\gamma$  – rake angle;  $\alpha$  – back clearance angle

Схема срезания припуска приведена на рис. 4.

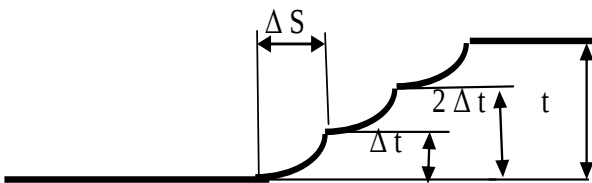


Рис. 4. Схема удаления припуска торцевой фрезой:  $\Delta t$  – глубина резания для каждого режущего элемента;  $t$  – глубина резания для фрезы в целом;  $\Delta S$  – радиальное смещение пластин по спирали (или конструктивная подача)

Fig. 4. Diagram of allowance removal by a face mill:  $\Delta t$  – cutting depth for each cutting element;  $t$  – cutting depth for the mill as a whole;  $\Delta S$  – radial displacement of plates in a spiral (or constructive feed)

Фреза, реализующая данную схему резания, показана на рис. 5.

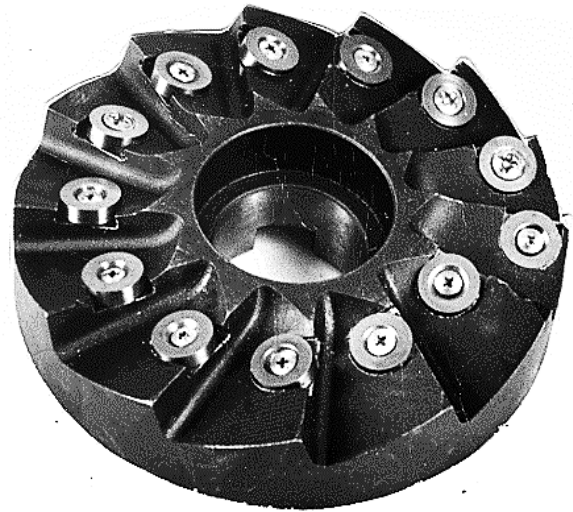


Рис. 5. Фреза с расположением цилиндрических пластин твердого сплава по спирали  
Fig. 5. Mill with spirally arranged hard alloy cylindrical plates

В основу взятой конструкции заложена схема переменного резания с обратными стружками. Данная схема резания получена расположением режущих пластин в плане по спирали Архимеда. По оси фрезы каждая пластина смещена относительно друг друга на толщину среза. Обработка элементов конструкции была выполнена при срезании стружек с шириной среза ( $\Delta t$ ) равной 0,3 мм и толщинами среза ( $a$ ) до 3 мм при фрезеровании заготовок из титановых сплавов BT20, BT22 и стали ДИ38Ш (9Г28Ю9МВБ). При фрезеровании титановых сплавов данная схема резания обеспечила увеличение минутной подачи до 3-х раз при удалении суммарного припуска до 5 мм. Для стали ДИ38Ш она является единственной пригодной для применения в производственных условиях, т.к. из-за чрезмерной склонности к упрочнению ее невозможно обрабатывать с малыми толщинами среза.

Кроме того, минутные подачи порядка 5...15 мм/мин очевидны, а также наблюдается низкая стойкость фрез [14], что не подходит для производства. Специ-

альные фрезы в процессе исследования обрабатываемости обеспечили увеличение минутной подачи до 100 мм/мин даже при применении твердого сплава ВК8. Применение современных марок сплавов типа ВП322 и ВРК15, имеющих высокую работоспособность [15], позволяет предполагать дальнейшую интенсификацию режимов фрезерования.

С учетом того, что графическое проектирование фрез достаточно трудоемко и в значительной степени зависит от квалификации конструктора, для исключения влияния субъективных факторов выполнена формализация их расчета. Проектирование фрез данной конструкции сводится к определению числа режущих пластин, необходимых для удаления припуска и их компоновки на технологической спирали. В зависимости от удаляемого припуска пластины могут быть расположены следующим образом:

- на одном витке спирали с равномерным окружным шагом;
- на одном витке спирали с неравномерным окружным шагом;
- на 2-х и более витках спирали с равномерным окружным шагом;
- на 2-х и более витках спирали с неравномерным окружным шагом;
- для небольших припусков возможна компоновка пластин на многозаходных спиралях.

Расчет параметров фрез выполняется в следующей последовательности:

1. Определяем диаметр рабочей части фрезы:

$$D = (1,1 \dots 1,2) B = 2 R_{\min}. \quad (1)$$

2. Находим число режущих элементов по формуле:

$$z = \frac{t}{\Delta t}. \quad (2)$$

3. Рассчитываем текущие значения радиусов расположения следующих пластин (параметр схемы резания):

$$R_i = R_{\min} + \Delta S(i - 1), \quad (3)$$

где  $i$  – порядковый номер пластинки от 1 до  $z$ ;  $\Delta S$  – конструктивная подача, мм.

4. Рекомендуемые значения конструктивной подачи приведены в табл. 1.

5. Определяем угловые расположения пластин в корпусах фрез относительно первой пластинки по следующей зависимости:

$$\cos \varphi_i = \frac{R_i + (R_i - \Delta S)^2 - C^2}{2R_i(R_i - \Delta S)}, \quad (4)$$

где  $C$  – постоянный коэффициент, зависящий от диаметра пластин.

Рассмотрим значения постоянных коэффициентов, которые приведены в табл. 2.

6. Далее проверяем возможные варианты компоновки пластин в корпусах фрез:

- при условии, если  $\sum_{i=1}^z \varphi_i \leq 360^\circ$ , (5)

то пластины располагают в корпусе в соответствии с расчетом;

- в том случае, если  $\varphi_1 \geq \frac{360^\circ}{z}$ , (6)

то возможна компоновка пластин с равномерным окружным шагом;

– если это условие не выполняется, то рекомендуется проверить возможность смешанной компоновки пластин, т.е. часть пластин расположить с расчетными (переменными) значениями угловых шагов, а часть (с постоянными) по соблюдению следующего ограничения:

$$\varphi_{i+1} \geq \frac{360^\circ - \sum \varphi_i}{z_i - 1}, \quad (7)$$

- если  $\sum \varphi_i \ll 360^\circ$ , (8)

то выполняется проверка возможности размещения на торце фрезы двух и более спиралей, число которых в общем случае может быть определено как отношение

$$N_{\text{сп}} = \frac{360^\circ}{\sum \varphi_i}. \quad (9)$$



Таблица 1

Рекомендуемые значения конструктивной подачи  
в зависимости от диаметра пластины

Table 1

Recommended values of constructive feed depending on the plate diameter

| Диаметр пластины,<br>$D_{пл}$ , мм | Макропогрешность формы<br>обработанной поверхности, мм | Конструктивная<br>подача, $\Delta S$ , мм |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| 9,525                              | 0,0036                                                 | 0,9                                       |
| 12,7                               | 0,0041                                                 | 1,1                                       |
| 15,875                             | 0,0053                                                 | 1,4                                       |

Таблица 2

Значение коэффициента  $C$

Table 2

Coefficient  $C$  value

| Диаметр пластины, $D_{пл}$ , мм | Коэффициент |
|---------------------------------|-------------|
| 9,525                           | 15,6        |
| 12,7                            | 20,8        |
| 15,875                          | 26          |

Дальнейшее повышение эффективности может быть обеспечено за счет расположения 2-го ряда пластин на спирали, что выполняется при соблюдении важных условий:

$$\left. \begin{array}{l} \sum \varphi_i > 360^\circ \\ R_{i-k} - R_i \geq D_{пл} + 2, \end{array} \right\} \quad (10)$$

где  $k$  – порядковый номер пластины, начиная с которой выполняются данные условия.

Если же данные условия не выполняются, то необходимо ограничить припуск производением  $\Delta t_z$ .

Далее определяем конструктивные размеры корпусов фрез по формуле

$$D_k = 2 \left( R_{max} + \frac{D_{пл}}{2} \right) + 3 \dots 5, \quad (11)$$

а также угол конуса расположения спирали

$$\arctg \psi = \frac{\Delta t}{\Delta S}. \quad (12)$$

Заключительным моментом проектирования является определение присоединительных мест фрез (см. рис. 6).

В соответствии с рекомендациями по стандартам [16], рекомендуется увеличивать базовый диаметр фрез с тангенциаль-

ным расположением пластин твердого сплава, что наглядно представлено в табл. 3, и рекомендуется выполнять его по 5-му качеству точности.

Для фрез больших диаметров присоединительные места можно выполнять как у инструмента с радиальным расположением пластин твердого сплава, рассмотрим рис. 7 и табл. 4.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработанные конструкции фрез прошли испытания в лабораторных и производственных условиях при обработке титановых сплавов ВТ6, ВТ20, ВТ22 и стали ДИЗ8Ш (только лабораторные). Режимы фрезерования для данных конструкций фрез определяются по данной формуле:

$$S_{мин} = n \Delta S N_{сп}, \quad (13)$$

где  $n$  – частота вращения шпинделя (зависит от скорости резания для примененной марки твердого сплава и обрабатываемого материала);  $\Delta S$  – конструктивная подача;  $N_{сп}$  – число заходов спирали Архимеда.

При фрезеровании титановых сплавов была достигнута минутная подача при глубине фрезерования  $t = 2,5 \dots 5$  мм до

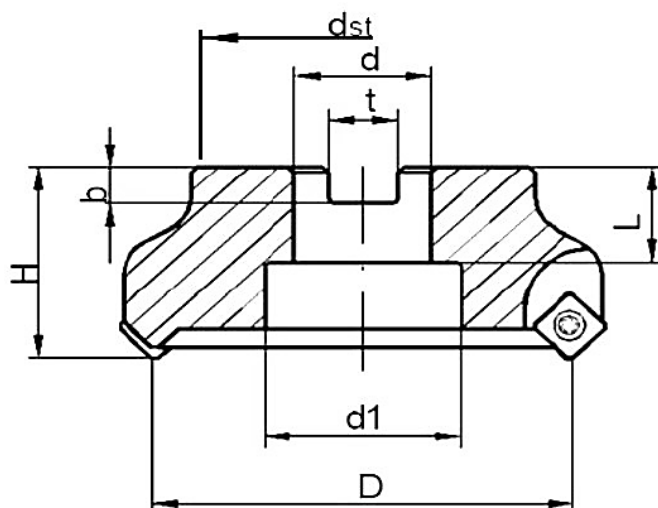


Рис. 6. Присоединительные места торцовых фрез  
 Fig. 6. Connecting places of face mills

Таблица 3

Присоединительные места торцовых фрез с тангенциальным расположением пластин твердого сплава

Table 3

Connecting places of face mills with tangential arrangement of hard alloy plates

| D   | $d_{H5}$ | H  | $t_{H11}$ | $b_{H11}$ | $L_{min}$ | $d_{1min}$ | $d_{2min}$ | $d_{st}$ |
|-----|----------|----|-----------|-----------|-----------|------------|------------|----------|
| 80  | 32       | 50 | 14,4      | 7         | 22        | 20         | 13         | 58       |
| 100 | 40       | 50 | 16,4      | 8         | 27        | 27         | 17         | 70       |
| 125 | 50       | 63 | 16,4      | 9         | 30        | 32         | 21         | 72       |
| 160 | 50       | 63 | 16,4      | 9         | 30        | 32         | 21         | 72       |
| 200 | 50       | 63 | 16,4      | 9         | 30        | 32         | 21         | 72       |

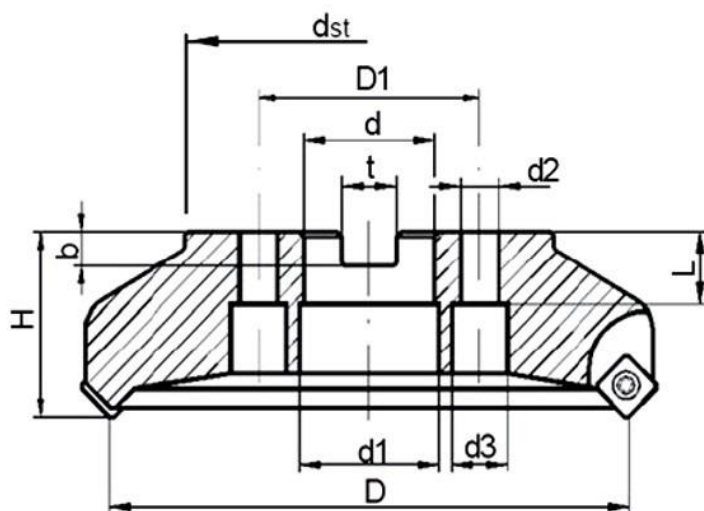


Рис. 7. Присоединительные места торцовых фрез больших диаметров  
 Fig. 7. Connecting places of face mills of large diameters



Таблица 4

**Присоединительные места торцовых фрез больших диаметров**

Table 4

**Connecting places of face mills of large diameters**

| D    | D1    | dn5 | H  | tn11 | bn12 | L  | d1min | D2min | D3min | dst |
|------|-------|-----|----|------|------|----|-------|-------|-------|-----|
| 160* | 66,7  | 40  | 63 | 16,4 | 9    | 31 | 56    | 14    | 20    | 90  |
| 160* | 101,6 | 50  | 63 | 25,7 | 14   | 32 | 70    | 18    | 26    | 140 |
| 200  | 101,6 | 60  | 63 | 25,7 | 14   | 32 | 70    | 18    | 26    | 140 |
| 250  | 101,6 | 60  | 63 | 25,7 | 14   | 32 | 70    | 18    | 26    | 170 |

Примечание. \* – размеры зависят от диаметров пиноли шпинделя.

Таблица 5

**Результаты сравнительных испытаний фрез  
при чистовой обработке титановых сплавов**

Table 5

**Results of comparative tests of mills at finishing treatment of titanic alloys**

| Типы торцовых фрез | Минутная подача, S <sub>мин</sub> , мм/мин | Глубина фрезерования, t, мм | Ширина фрезерования, B, мм | Длина обработки, L, мм | Время обработки, t <sub>о</sub> , мин | Высота микро-неровностей, R <sub>a</sub> , мкм |
|--------------------|--------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------|
| 1                  | 700                                        | 0,5                         | 0,8d                       | 7000                   | 10                                    | 1,25                                           |
| 2                  | 150                                        | 0,5                         | 0,8d                       | 7000                   | 47                                    | 2,5                                            |
| 3                  | 120                                        | 0,5                         | 0,8d                       | 7000                   | 58                                    | 1,25                                           |
| 4                  | 60                                         | 0,5                         | 0,8d                       | 7000                   | 117                                   | R <sub>z</sub> = 20                            |

Примечание: 1 – фрезы с тангенциальным расположением цилиндрических пластин твердого сплава на многозаходной торцовой спирали; 2 – фрезы с тангенциальным расположением призматических пластин твердого сплава на окружности; 3 – торцовые хвостовые радиусные фрезы с неперетачиваемыми пластинками; 4 – фрезы со вставными ножами с напайными пластинками твердого сплава (применяемые на предприятиях).

160 мм/мин при стойкости порядка 45...60 мин., а при фрезеровании стали ДИЗ8Ш – до 100 мм/мин, стойкость при этом (во избежание нагартовки обработанной поверхности) в случае разрушения пластин была ограничена временным интервалом 20...30 мин.

Дополнительно выполнялись испытания фрез при чистовой обработке деталей из титановых сплавов. Результаты сравнительных испытаний специальных торцовых фрез для чистовой обработки и инструмента общего применения приведены в табл. 5.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение специальных конструкций торцовых фрез с переменными схемами резания обеспечивает эффективную (как черновую, так и чистовую) обработку из ти-

тановых сплавов и специальной стали. Особенно эффективны фрезы с пластинками, расположенными на многозаходных спиралях при чистовой обработке, т.к. они обеспечивают многократное повышение минутной подачи даже при применении старых марок твердых сплавов. Выполненные исследования показали, что при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов возможна интенсификация режимов фрезерования даже в условиях применения традиционных инструментальных материалов не менее чем в 1,5–4 раза, а при узкой специализации инструмента – значительно выше (более 10 раз). Следует отметить, что интенсификация режимов фрезерования была обеспечена увеличением допустимых сечений среза без увеличения скорости резания. Предложенная методика расчета позволяет проектировать специальные фрезы даже конструкторам средней квалификации.

**Библиографический список**

1. Беянин П.Н. Производство широкофюзеляжных самолетов. М.: Машиностроение, 1979. 256 с.
2. Беянин П.Н. Технология и оборудование для производства широкофюзеляжных самолетов в США. М.: Машиностроение, 1979. 255 с.
3. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
4. Ларин М.Н. Высокопроизводительные конструкции фрез и их рациональная эксплуатация. М.: Машгиз, 1957. 272с.
5. Обзорный каталог фрезерного инструмента [Электронный ресурс] // Интернет-каталог «Membtr IMC Group. Ingtrsol Cutting Tools». 2008. 71 с. URL: [http://intercos-tooling.ru/download/Ingersoll\\_rus.pdf](http://intercos-tooling.ru/download/Ingersoll_rus.pdf) (дата обращения: 23.04.2019).
6. Балла О.М. Повышение эффективности фрезерования деталей из титановых сплавов // Авиационная промышленность. 1989. № 11. С. 44–46.
7. Исследование эффективности тангенциального расположения пластин твердого сплава при фрезеровании // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 21 № 2(121). С. 10–20.
8. Балла О.М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология. 3-е изд. СПб.: Лань, 2018. 368 с.
9. Brach K. Frasen und Aufbohren mit Werkzeugen mit tangentialen Wendeschneidplatttn // Werkstatt und Betr. 1981. Vol. 114. No. 4. P. 257–258.
10. Kahles J.F., Field M., Eylon D. and Froes F.H. Cutting of Titanium Alloys // Journal of metals. 1985. Vol. 37. No. 4. P. 27–35.
11. Люкшин В.С. Теория винтовых поверхностей в проектировании инструмента. М.: Машиностроение, 1968. 372 с.
12. Сидоренко С.М. Вычислительная геометрия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1983. 160 с.
13. Михайлов Г.А. Анализ схем резания и способов разделения срезаемых слоев металла // Научные труды ВЗМИ. 1978. № 35. С. 25–29.
14. Петруха П.Г., Чубаров А.Д., Стерлин Г.А., Данилин Н.Т., Буянова Т.Л. Обработка резанием высокопрочных коррозионностойких и жаропрочных сталей. М.: Машиностроение, 1980. 167 с.
15. Балла О.М. Экспериментальные методы исследование в технологии машиностроения. СПб.: Лань, 2019. 168 с.
16. Балла О.М. Инструментообеспечение современных станков с ЧПУ. СПб.: Лань, 2017. 200 с.

**References**

1. Belyanin P.N. *Proizvodstvo shirokofyuzelyazhnyh samoletov* [Production of wide-body aircrafts]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979, 256 p. (In Russ.).
2. Belyanin P.N. *Tekhnologiya i oborudovanie dlya proizvodstva shirokofyuzelyazhnyh samoletov v SShA* [Technology and equipment for the production of wide-body aircrafts in the USA]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1979, 255 p. (In Russ.).
3. Bobrov V.F. *Osnovy teorii rezaniya metallov* [Fundamentals of the metal cutting theory]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1975, 344 p. (In Russ.).
4. Larin M.N. *Vysokoproizvoditel'nye konstrukcii frez i ih racional'naya ekspluatatsiya* [High-performance design of mills and their rational operation]. Moscow: Mashgiz Publ., 1957, 272 p. (In Russ.).
5. Overview catalogue of milling tools. On-line catalogue "Membtr IMC Group. Ingtrsol Cutting Tools". 2008, 71 p. Available at: [http://intercos-tooling.ru/download/Ingersoll\\_rus.pdf](http://intercos-tooling.ru/download/Ingersoll_rus.pdf) (accessed 23 April 2019).
6. Balla O.M. Improving the milling efficiency of titanium alloy parts. *Aviacionnaya promyshlennost'* [Aviation Industry], 1989, no. 11, pp. 44–46. (In Russ.).
7. Balla O.M. Investigation of the efficiency of tangential arrangement of hard alloy plates during milling. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 21, no. 2(121), pp. 10–20. (In Russ.).
8. Balla O.M. *Obrabotka detalej na stankah s chislovym programmym upravleniem. Oborudovanie. Osnastka. Tekhnologiya* [Machining of parts on CNC machine-tools. Equipment. Tooling. Technology]. Saint-Petersburg: Lan' Publ., 2018, 368 p. (In Russ.).
9. Brach K. Frasen und Aufbohren mit Werkzeugen mit tangentialen Wendeschneidplatttn. *Werkstatt und Betr.* 1981, vol. 114, no. 4, pp. 257–258.
10. Kahles J.F., Field M., Eylon D. and Froes F.H. Cutting of Titanium Alloys. *Journal of metals*, 1985, vol. 37, no. 4, pp. 27–35.
11. Lyukshin V.S. *Teoriya vintovykh poverkhnostej v proektirovani instrumenta* [Theory of spiral surfaces in tool design]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1968, 372 p. (In Russ.).
12. Sidorenko S.M. *Vychislitel'naya geometriya v mashinostroenii* [Computational geometry in mechanical engineering]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1983, 160 p. (In Russ.).
13. Mihajlov G.A. Analysis of cutting schemes and separation methods of cut metal layers. *Nauchnye trudy Vsesoyuznogo zaochnogo mashinostroitel'nogo instituta* [Scientific works of the All-Union Correspondence Machine-Building Institute], 1978, no. 35, pp. 25–29. (In Russ.).
14. Petruha P.G., Chubarov A.D., Sterlin G.A., Danilin N.T., Buyanova T.L. *Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh korroziionnostojkih i zharoprochnykh staley* [Cutting of high-strength corrosion-resistant and heat-resistant steels]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1980, 167 p. (In Russ.).
15. Balla O.M. *Eksperimental'nye metody issledovanie v tekhnologii mashinostroeniya* [Experimental research



methods in mechanical engineering technology]. Saint-Petersburg: Lan' Publ., 2019, 168 p. (In Russ.).  
14. Balla O.M. *Instrumentoobespechenie sovremennyh*

#### **Критерии авторства**

Балла О.М. провел исследование, оформил научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Балла Олег Михайлович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры технологии и оборудования  
машиностроительных производств,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
Институт авиамашиностроения и транспорта,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: ballaom@mail.ru

*stankov s chislovym programmnyim upravleniem* [Tool supply of modern CNC machine-tools]. Saint-Petersburg: Lan' Publ., 2017, 200 p. (In Russ.).

#### **Authorship criteria**

Balla O.M. autor have conducted research, formalized research result and bear responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Oleg M. Balla**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Technology  
and Equipment of Machine-Building Production,  
Irkutsk National Research Technical University,  
Institute of Aircraft Engineering and Transport,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: ballaom@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.314.632

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-443-450>

## Автоматизированная система научных исследований технологического процесса сушки древесины

© А.М. Дунаев, М.П. Дунаев

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

**Резюме:** Цель – создание автоматизированной системы технологического процесса сушки древесины, позволяющей исследовать физические процессы, протекающие в сушильной камере. Применяется комбинированный метод сушки пиломатериалов, который сочетает осциллирующий режим с естественной циркуляцией, включающей кратковременное циклическое открывание выпускного клапана сушильной камеры, с периодическим запуском принудительного вращения. Разработан алгоритм комбинированного режима сушки пиломатериалов. Предложена функциональная схема автоматизированной системы научных исследований технологического момента сушки древесины. Реализована схема упорядоченной автоматики научных исследований технологического процесса сушки древесины, которая позволяет управлять им, а также исследовать физические процессы, протекающие в сушильной камере. Автоматический этап управления профильных разработок технологического действия сушки древесины основан на использовании современных информационно-управляющих устройств, таких как программируемый логический контроллер, микропроцессорные регуляторы и промышленный преобразователь частоты.

**Ключевые слова:** автоматизированная система научных исследований, комбинированный алгоритм сушки, функциональная схема, промышленный преобразователь частоты

**Информация о статье:** Дата поступления 22 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 13 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Дунаев А.М., Дунаев М.П. Автоматизированная система научных исследований технологического процесса сушки древесины. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):443–450. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-443-450

## Automated system of scientific studies of the technological process of wood drying

Andrey M. Dunaev, Mikhail P. Dunaev

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the article is to create an automated system of the technological process of wood drying that allows to research the physical processes, which take place in the drying chamber. The study employs a combined method of timber drying, which integrates an oscillating mode and natural circulation including the short-term cyclic opening of the outlet valve of the drying chamber with the periodic start of the forced circulation. The algorithm of the combined mode of timber drying is developed. A functional diagram of the automated system of scientific studies of the technological process of wood drying is proposed. A scheme of the ordered automation of the scientific studies of the technological process of wood drying is implemented. It allows both to control the process of wood drying and study the physical processes occurring in the drying chamber. An automated control stage of the specialized developments of the technological process of wood drying is based on the use of modern information-control devices, such as a programmed logical controller, microprocessor regulators and an industrial frequency converter.

**Keywords:** automated system of scientific studies, combined algorithm of drying, functional diagram, industrial frequency converter

**Information about the article:** Received February 22, 2019; accepted for publication March 13, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Dunaev A.M., Dunaev M.P. Automated system of scientific studies of the technological process of wood drying. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):443–450. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-443-450

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время значительная часть промышленных лесосушильных камер, использующих естественную циркуляцию сушильного агента, имеет невысокие технические характеристики. Особенно это касается значительного времени сушки и повышенных энергетических затрат [1].

Частичное преодоление первого недостатка лесосушильных камер с естественной циркуляцией (значительного времени сушки) возможно с помощью применения осциллирующих режимов [2].

Сущность осциллирующего режима заключается в том, что весь процесс сушки разбит на повторяющиеся временные циклы прогрева и охлаждения штабеля древесины [3]. Температурная разница между циклом прогрева и охлаждения составляет около 10–15°C.

Технологический процесс сушки начинается с цикла повышения температуры в сушильной камере, при этом температура верхних слоев древесины увеличивается. При последующей реализации цикла охлаждения происходит понижение влажности и температуры воздуха в сушильной камере, при этом наружные слои древесины начинают отдавать влагу. В результате этого температура наружных слоев древесины становится ниже температуры внутренних слоев. Основным эффектом от применения осциллирующих режимов заключается в продвижении влаги от более нагретых слоев древесины к менее нагретым слоям. Все это приводит не только к ускорению процесса сушки, но и к тому, что сушка происходит более равномерно, тем самым предотвращая опасные напряжения в пиломатериале [4].

Существенному снижению времени сушки древесины в лесосушильных камерах и уменьшению количества энергии, затраченной в процессе сушки пиломатериалов, способствует применение комбинированных режимов работы лесосушильных камер [5–7].

Совмещенный режим сушки пиломатериалов сочетает осциллирующий режим с естественной циркуляцией, включающей

кратковременное циклическое открывание выпускного клапана сушильной камеры (с периодическим включением принудительной циркуляции) [8–10].

## **2. КОМБИНИРОВАННЫЙ РЕЖИМ СУШКИ ПИЛОМАТЕРИАЛОВ**

Алгоритм комбинированного режима сушки пиломатериалов представлен на рис. 1. Нагрев в камере включается до достижения сушильным агентом значения  $t_{ц.п.}$  – температуры циклового прогрева. Время указанного этапа составляет  $t_{ц.п.}$ . Далее нагрев отключается до достижения  $t_{ц.о.}$  – температуры циклового охлаждения. Быстрому переходу от оборотного прогрева к цикловому охлаждению способствует кратковременная вентиляция сушильной камеры посредством включения вентилятора. После завершения этапа циклового охлаждения, время которого составляет  $t_{ц.о.}$ , происходит переход к этапу циркулирующего прогрева.

Процесс сушки пиломатериала заканчивается, когда влажность в камере достигает заданного значения  $W_3$ .

Для исследования процессов сушки пиломатериала предложена автоматизированная система научных исследований (АСНИ) [11, 12] технологического процесса сушки древесины.

## **3. АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СУШКИ ДРЕВЕСИНЫ**

АСНИ технологического процесса сушки древесины позволяет управлять процессом сушки, а также исследовать физические процессы, протекающие в сушильной камере. Функциональная схема АСНИ технологического процесса сушки древесины показана на рис. 2.

В корпус камеры помещен штабель пиломатериала. Нагрев воздуха в камере производится при помощи теплоэлектронагревателей (ТЭН), управляемых системой управления (СУ) сушильной камеры по программе, заданной в управляющем персо-



нальном компьютере (ПК). Подача напряжения питания  $U_n$  на ТЭН производится включением магнитного контактора (КМ) по сигналу управления  $X_T$ . Питание КМ осуществляется от источника питания  $U_c$ .

Периодический продув камеры происходит посредством центробежного вентилятора, приводимого в движение асинхронным двигателем, питаемым от преобразователя частоты (ПЧ), который управляется СУ. При этом вход сухого воздуха производится через входной клапан, а выведение влажного воздуха, прошедшего через штабель, производится через выходной клапан. Питание ПЧ осуществляется от источника питания  $U_c$ . Управление ПЧ проводится по сигналу управления  $X_V$ . Контроль температуры  $t$  и влажности  $W$  в камере и внутри штабеля производится, соответственно, при помощи регуляторов температуры (РТ) и влажности (РВ), а также их датчиков. Сигналы  $U_T$  и  $U_W$  от датчиков температуры и влажности передаются в СУ, которая через интерфейс подключена к ПК. В ПК хранится программа сушки и ведется контроль параметров данного процесса. Контроль напора сухого воздуха  $V$  на входе в камеру производится при помощи регулятора напора (РН), а также датчика напора, сигнал  $U_V$  которого также передается в СУ. Текущие сигналы заданных температуры ( $T_3$ ), влажности ( $W_3$ ) и напора ( $V_3$ ) поступают на вход соответствующих регуляторов РТ, РВ и РН через интерфейс от программы сушки из ПК. Процесс сушки пиломатериала заканчивается по сигналу управления  $X_W$ , когда влажность в камере достигает поставленного значения  $W_3$ .

Результаты исследований технологического процесса [13] сушки древесины отображаются и фиксируются посредством служебной программы МСТ10 в памяти персонального компьютера ПК, после чего могут быть доступны для анализа и последующей корректировки настроек АСНИ технологического процесса сушки древесины.

Внешний вид АСНИ технологического процесса сушки древесины показан на рис. 3., включает в себя корпус сушильной камеры (металлический шкаф размером

500×500×150 мм), внутри которого находятся теплоэлектронагреватели (ТЭН с мощностью 0,5 кВт); два датчика температуры (ДТС105-50М.В3.80); датчик влажности. Справа от корпуса сушильной камеры находится центробежный вентилятор (GRSHV 40/8), приводимый во вращение асинхронным двигателем (4AA63B4Y3, мощность  $P_n = 0,55$  кВт), управляемым преобразователем частоты (Danfoss AQUA Drive FC202 [14], мощность  $P_n = 0,55$  кВт). Преобразователь частоты [15], два микропроцессорных одноканальных измерителя-регулятора температуры (TPM1A-Д и TPM1Б-Н), преобразователь интерфейса (ОВЕН АС3-М RS232/485), автоматические выключатели и другое электрооборудование расположены в двух шкафах управления АСНИ (размеры шкафов 500×400×250 мм каждый). Внешний вид шкафов управления АСНИ показан на рис. 4.

Контроль текущей влажности испытуемых образцов пиломатериалов осуществлялся с помощью следующих измерительных устройств:

- игольчатого влагомера с выносными электродами (Sh0453, производство ЗАО «Научная электроника»);

- переносного влагомера (СЕМ DT-129, производство КНР).

Контакты влагомеров расположены в верхней и нижней части штабеля пиломатериала, что способствует получению более объективной информации о влажности древесины.

Для измерения влажности воздуха внутри корпуса сушильной камеры использовался датчик влажности (Honeywell HNH-4000-003). Этот емкостной датчик влажности построен на основе термореактивного полимера и имеет высокую надежность во всем диапазоне измерения от 0 до 100%. Выходной сигнал датчика имеет линейную зависимость от измеряемой влажности.

Внешний вид сушильной камеры АСНИ представлен на рис. 5, где показано: 1 – теплоэлектронагреватели (закрыты металлическим защитным кожухом); 2 – штабель пиломатериала; 3 – воздухопровод от центробежного вентилятора; 4 – впускной кла-

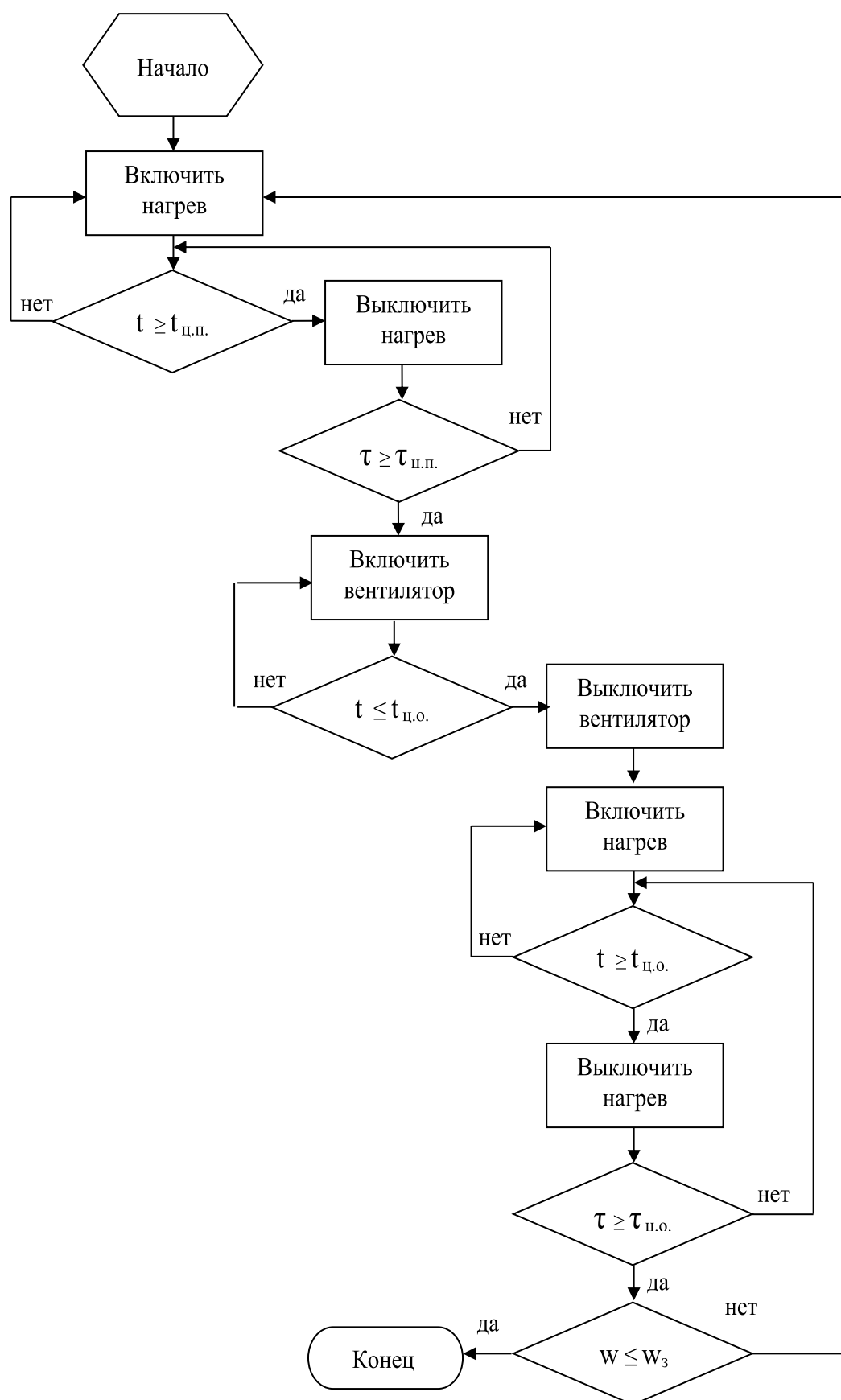


Рис. 1. Алгоритм комбинированного режима сушки пиломатериалов  
 Fig. 1. Algorithm of the combined mode of timber drying

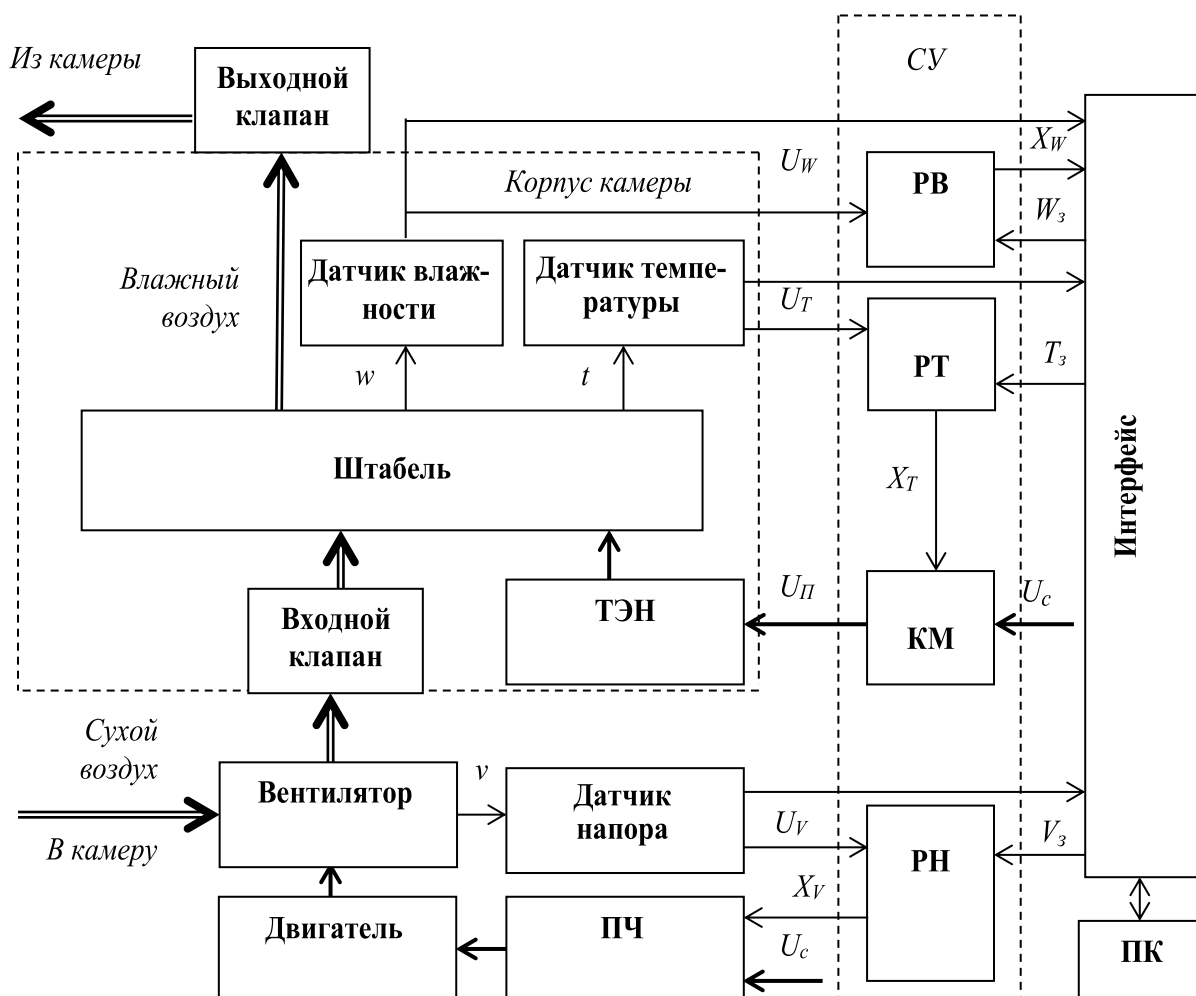


Рис. 2. Функциональная схема автоматизированной системы научных исследований технологического процесса сушки древесины

Fig. 2. Functional diagram of the automated system of scientific studies of the technological process of wood drying



Рис. 3. Внешний вид автоматизированной системы научных исследований технологического процесса сушки древесины

Fig. 3. External view of the automated system of scientific studies of the technological process of wood drying



Рис. 4. Внутренний вид шкафов управления автоматизированной системы научных исследований  
Fig. 4. Internal view of the control cabinets of the automated system of scientific studies

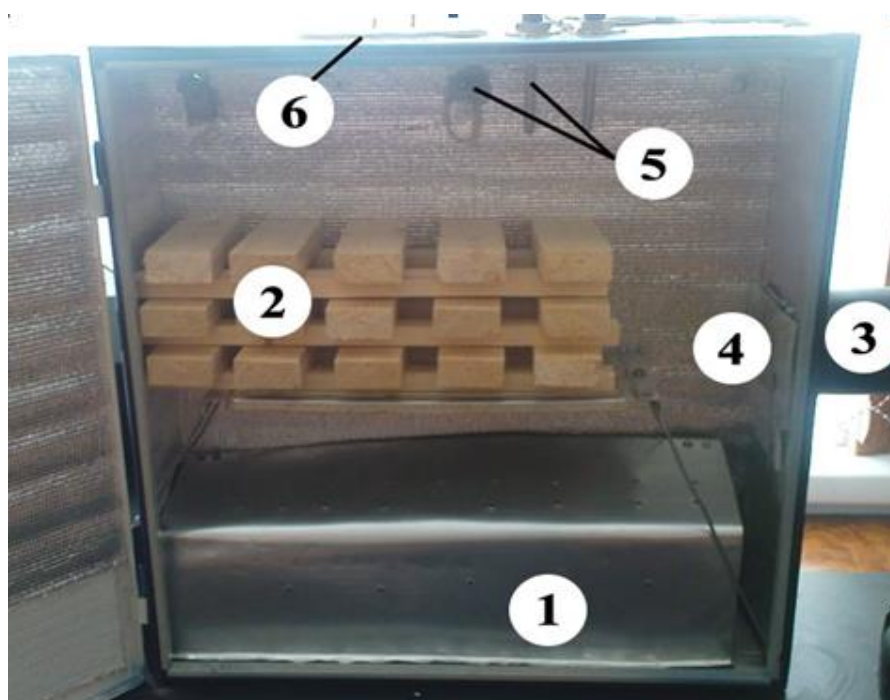


Рис. 5. Внешний вид сушильной камеры автоматизированной системы научных исследований  
Fig. 5. External view of the drying chamber of the automated system of scientific studies

пан; 5 – датчики влажности и температуры; 6 – выпускной клапан. Впускной и выпускной клапаны установлены на входе и выходе из корпуса сушильной камеры и работают автоматически.

Эксперименты производятся в автоматическом режиме при помощи программируемого логического контроллера, кото-

рым комплектуется преобразователь частоты Danfoss AQUA Drive FC202.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в статье автоматизированная система научных исследований технологического процесса сушки древе-



сины позволяет детально исследовать физические процессы, протекающие в сушильной камере, а также применять комбинированные режимы работы лесосушильных ка-

мер, обеспечивающие снижение времени сушки древесины и уменьшение количества энергии, затраченной в процессе высушивания пиломатериалов.

#### Библиографический список

1. Шубин Г.С. Сушка и тепловая обработка древесины. М.: Лесная промышленность, 1990. 336 с.
2. Любовицкий П.В. Сушка древесины с цикловым прогревом: опыт работы предприятий. М.: Лесная промышленность, 1986. 49 с.
3. Сергеев В.В., Тракало В.И. Повышение эффективности сушки пиломатериалов. Екатеринбург: Уральский государственный лесотехнический университет, 2005. 225 с.
4. Михеев А.А., Дунаев М.П. Пути модернизации лесосушильных камер с естественной циркуляцией // Электротехнические комплексы и системы: межвуз. сб. Уфа: Уфимский государственный авиационный технический университет, 2011. С. 141–144.
5. Михеев А.А. Способ комбинированной циркуляции в лесосушильной камере // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4(32). С. 202–205.
6. Михеев А.А., Дунаев М.П. Алгоритмы комбинированного режима в лесосушильной камере // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1(33). С. 164–166.
7. Михеев А.А., Дунаев М.П. Способ сушки древесины с комбинированной циркуляцией воздуха в камере // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2012. № 4(63). С. 168–172.
8. Михеев А.А. Применение комбинированной циркуляции в лесосушильной камере // Энергетика в современном мире: материалы молодежной науч.-практ. конф. (г. Чита, 15–16 ноября 2011 г.). Чита, 2011. С. С. 46–51.
9. Михеев А.А. Математические модели лесосушильной камеры с комбинированной циркуляцией // Теория и практика современной науки: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. М.: Спецкнига, 2012. С. 300–304.
10. Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Филатова Н.С., Лившиц А.В., Каргапольцев С.К. Автоматизация контроля структурных превращений в полимерных материалах при термической обработке // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 1(49). С. 117–125.
11. Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В. Автоматизация процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах // Информационные системы и технологии. 2017. № 1(99). С. 44–53.
12. Mukhopad Yu.F., Dunaev M.P., Mariukhnenko V.F., Skrypnik O.N., Szykh 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.
13. Dunaev M.P., Arsentiev O.V., Arsentiev G.O. Research of energy characteristics of frequency-regulated electric drive // Journal of Physics: Conference Series. 2018. P. 118–125.
14. Pulyakov A.V., Dunaev M.P., Arsentiev G.O. A universal control method of auxiliary electric motors // Advances in Engineering Research. Atlantis Press. 2018. Vol. 158. P. 109–113.

#### References

1. Shubin G.S. *Sushka i teplovaya obrabotka drevesiny* [Drying and heat treatment of wood]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1990, 336 p. (In Russ.).
2. Lyubovickij P.V. *Sushka drevesiny s ciklovym progrevom: opyt raboty predpriyatij* [Wood drying with cyclic heating: experience of enterprise operation]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ., 1986, 49 p. (In Russ.).
3. Sergeev V.V., Trakalo V.I. *Povyshenie effektivnosti sushki pilomaterialov* [Ways of modernization of drying chambers with natural circulation]. Ekaterinburg: Ural State forest engineering University Publ., 2005, 225 p.
4. Miheev A.A., Dunaev M.P. *Puti modernizatsii lesosushil'nyh kamer s estestvennoj cirkulyaciej* [Modernization directions of wood-drying chambers with natural circulation]. *Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy: mezhvuzovskij sbornik* [Electrotechnical systems and complexes: interuniversity collection of articles]. Ufa: Ufa State Aviation Technical University Publ., 2011, pp. 141–144. (In Russ.).
5. Miheev A.A. *Sposob kombinirovannoj cirkulyacii v lesosushil'noj kamere* [The combined circulation in leas-urely camera]. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2011, no. 4(32), pp. 202–205. (In Russ.).
6. Miheev A.A., Dunaev M.P. Algorithms of combined mode in timber drying chamber. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2012, no. 1(33), pp. 164–166. (In Russ.).
7. Miheev A.A. The method of combined circulation in timber drying chamber. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling], 2011, no. 4(32), pp. 202–205. (In Russ.).
8. Miheev A.A., Dunaev M.P. Method of wood drying with combined circulation of air in kiln. *Vestnik Irkutskogo*

gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2012, no. 4(63), pp. 168–172. (In Russ.).

8. Miheev A.A. *Primenenie kombinirovannoj cirkulyacii v lesosushil'noj kamere* [Use of combined circulation in the wood drying chamber]. *Materialy molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Energetika v sovremennom mire"* [Materials of the Youth Scientific and Practical Conference "Power Engineering in the Modern World", Chita, 15–16 November 2011]. Chita, 2011. С. 46–51. (In Russ.).

9. Miheev A.A. *Matematicheskie modeli lesosushil'noj kamery s kombinirovannoj cirkulyaciej* [Mathematical models of wood drying chamber with combined circulation]. *Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Teoriya i praktika sovremennoj nauki"* [Materials of VIII International Scientific and Practical Conference "Theory and Practice of Modern Science"], Moscow: Speckniga Publ., 2012, pp. 300–304. (In Russ.).

10. Butorin D.V., Filippenko N.G., Filatova N.S., Livshic A.V., Kargapol'cev S.K. Automation of control of struc-

tural transformation in polymeric materials at heat treatment. *Sovremennye tekhnologii. Sistemnyj analiz. Modelirovanie* [Modern technologies. System analysis. Modeling], 2016, no. 1(49), pp. 117–125. (In Russ.).

11. Butorin D.V., Filippenko N.G., Livshic A.V. Automation process control of phase and relaxation transformation in polymer materials. *Informacionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technologies], 2017, no. 1(99), pp. 44–53. (In Russ.).

12. 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.

13. Dunaev M.P., Arsentiev O.V., Arsentiev G.O. Research of energy characteristics of frequency-regulated electric drive. *Journal of Physics: Conference Series*, 2018, pp. 118–125.

14. Pulyakov A.V., Dunaev M.P., Arsentiev G.O. A universal control method of auxiliary electric motors. *Advances in Engineering Research*. Atlantis Press, 2018, vol. 158, pp. 109–113.

#### **Критерии авторства**

Дунаев А.М., Дунаев М.П. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Dunaev A.M., Dunaev M.P. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

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

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Дунаев Андрей Михайлович**,  
аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: west-ma@yandex.ru

**Дунаев Михаил Павлович**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры электропривода  
и электрического транспорта,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: mdunaev10@mail.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Andrey M. Dunaev**,  
Postgraduate student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: west-ma@yandex.ru

**Mikhail P. Dunaev**,  
Dr., Sci. (Eng.),  
Professor of the Department of Electric Drive  
and Electric Transport,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: mdunaev10@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.01

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-451-462>

## Оценка точности и прочности модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений

© В.А. Ильных, В.Е. Ярилов, Е.А. Рожкова

*Забайкальский институт железнодорожного транспорта,  
филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, г. Чита, Россия*

**Резюме:** Цель – определение величин упругих перемещений оправок при оценке напряженно-деформированного состояния сборных конструкций «шпиндель-инструментальная оправка», выполненных на основе конических разъемных профильных соединений в условиях статического нагружения. Оценка точности и прочности конического разъемного профильного соединения с равноосным контуром с числом граней равным трем узла шпиндель-инструментальной оправки, предназначенного для передачи крутящего момента. Для исследования напряженно-деформированного состояния модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений использовались методы численного решения задач теории упругости, в том числе метод конечных элементов, а также методы математической статистики и вычислительной техники. Предложены результаты комплексного исследования, напряженно-деформированного состояния сборных конструкций шпиндельного узла многоцелевых станков, а именно: модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений с равноосным контуром. Проведен анализ влияния конструктивных параметров конического профильного соединения, а также сил закрепления (при способе фиксации по величине сборочной силы), величин предельных внешних нагрузок, сил трения на точность и прочность сопряжения шпиндель-инструментальной оправки с профильной посадочной поверхностью хвостовика для реальных размеров сборной конструкции модуля. Определены величины упругих перемещений сечений инструментальных оправок по посадочной длине профильного соединения с использованием математического аппарата метода конечных элементов на основе сплайн-аппроксимации и вариационно-энергетического принципа метода перемещений теории упругости. Рассчитаны величины упругих перемещений оправки; напряжений в радиальном, нормальном и окружном направлениях по объему инструментальной оправки и шпинделя. Для расчетов применялось программное обеспечение в среде FEMAP 11.1 with NX NASTRAN. Установлено, что величины упругих перемещений сечений инструментальной оправки изменяются нелинейно, и их величина на торце не превышает 1,8 мкм при предельных внешних нагрузках соединения. Соответственно, максимальные величины нормальных контактных напряжений в крайних сечениях шпинделя не превышают 7,71 МПа.

**Ключевые слова:** профильное соединение, модульная система вспомогательного инструмента, упругие перемещения, контактные напряжения, шпиндельный узел, многоцелевой станок

**Информация о статье:** Дата поступления 7 марта 2019 г.; дата принятия к печати 12 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Ильных В.А., Ярилов В.Е., Рожкова Е.А. Оценка точности и прочности модульной системы вспомогательного инструмента на основе профильных соединений. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):451–462. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-451-462

## Assessment of auxiliary tool modular system accuracy and durability on the basis of profile joints

Viktor A. Ilinykh, Vitaly E. Yarilov, Elena A. Rozhkova

*Trans-Baikal Institute of Railway Transport, branch of Irkutsk State Transport University, Chita, Russia*

**Abstract:** The purpose of the paper is to determine the values of elastic movements of mandrels when assessing the stress-strain state of modular constructions of a spindle-instrumental mandrel designed on the basis of conical detachable profile joints under static loading, and to estimate the accuracy and durability of a conical detachable profile joint designed for torque transmitting and featuring an equiaxial contour with a number of faces equal to three spindle-instrumental mandrel assemblies. The methods of numerical solution of elasticity theory problems including the finite-element method (FEM) as well as the methods of mathematical statistics and computer technology are used to study the stress-strain state of the

modular system of an auxiliary tool based on profile joints. The paper provides the results of a complex research, the stress-strain state of modular structures of the multi-purpose machine-tool spindle assembly, namely: a modular system of an auxiliary tool based on profile joints with the equiaxial contour. The article analyzes the influence of design parameters of a conical profile joint, retaining pressure (with the fixation method by the magnitude of the assembly force), values of limiting external loads and friction forces on the accuracy and strength of spindle-instrumental mandrel joint with a profile mounting surface of the shank for actual dimensions of the modular design of the assembly. The values of elastic displacements of instrumental mandrel sections along the mounting length of the profile joint are determined with the use of the mathematical apparatus of the finite-element method based on spline approximation and a variation-energy principle of the displacement method of the elasticity theory. The calculation is performed of the values of elastic displacements of a mandrel and stresses in radial, normal and circumferential directions by the volume of the instrumental mandrel and spindle. Software in FEMAP 11.1 environment with NX NASTRAN has been applied for calculations. It has been determined that the values of elastic displacements of instrumental mandrel sections change nonlinearly and their value at the end face does not exceed 1.8  $\mu\text{m}$  under the limiting external loads of the joint. Accordingly, the maximum values of the normal contact stresses in the extreme sections of the spindle do not exceed 7.71 MPa.

**Keywords:** profile joint, auxiliary tool modular system, elastic displacements, contact stresses, spindle assembly, multi-purpose machine-tool

**Information about the article:** Received March 7, 2019; accepted for publication April 12, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Ilinykh V.A., Yarilov V.E., Rozhkova E.A. Assessment of auxiliary tool modular system accuracy and durability on the basis of profile joints. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):451–462. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-451-462

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Многоцелевые станки (МС) в настоящее время получили широкое применение в металлообработке при изготовлении, в частности, корпусных деталей в условиях мелкосерийного производства. Развитие МС ведется в двух направлениях – это повышение их производительности, а также точности станков. Актуальными научно-техническими задачами является повышение быстроходности и мощности привода главного движения станка, необходимое для механической обработки корпусных деталей современным инструментом, а также реализация процесса и сокращение времени автоматической смены инструмента и спутников с деталями. В частности, представляет научно-практический интерес обеспечение точности и прочности инструментального модуля многоцелевого станка на основе применения инновационных решений, а именно: внедрения прогрессивных моментопередающих соединений. Под модулем системы вспомогательного инструмента, согласно определению профессора О.И. Аверьянова, понимается подсистема вспомогательного инструмента для станков с числовым программным управлением (ЧПУ) сверлильно-расточной и фрезерной групп [1–14]. При этом главным критерием

качества станка остается обеспечение высокой точности изготовления изделий. Проведенный литературный и патентный поиск возможных решений показал, что в данном направлении сделаны и ведутся широкие исследования, как в России, так и за рубежом. Известны работы, посвященные модульному принципу построения многоцелевых станков, повышению эффективности функционирования инструментальных систем автоматизированного станочного оборудования [1, 5].

## 2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью исследования данной работы является определение величин упругих перемещений оправок при оценке напряженно-деформированного состояния сборных конструкций «шпиндель-инструментальная оправка», выполненных на основе конических разъемных профильных соединений в условиях статического нагружения.

## 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводились при использовании методики компьютерного моделирования, разработанной [3, 8, 11] при построении геометрических моделей деталей модуля, а именно: соединения «шпин-



дель-инструментальная оправка», методов численного решения задач теории упругости, в том числе метода конечных элементов (МКЭ), а также метода математической статистики и вычислительной техники [2].

В работе [7] автором внедрены математические модели контактной задачи деформируемых тел, предназначенные для анализа сборных конструкций роторов (с использованием модифицированного вариационно-энергетического метода перемещений). В связи с этим представляется возможным проведение анализа напряженно-деформированного состояния сборной конструкции шпиндельного узла типа «шпиндель-инструментальная оправка» многоцелевого станка с использованием метода численного решения МКЭ, где упругий расчет моделей сборной конструкции шпиндельного узла «шпиндель-инструментальная оправка» выполняется на основе известных зависимостей теории упругости и принципа виртуальных перемещений [4, 9, 12–14], который приводит к общеизвестному принципу стационарности потенциальной энергии механической системы.

Необходимое условие непрерывности при использовании конечно-элементной аппроксимации формулируется согласно [4] в следующем виде: «аппроксимирующая функция должна быть непрерывна вместе со своими производными до  $(n - 1)$  порядка включительно; наличие у производных  $n$ -го порядка разрывов ступенчатого типа допускается, поскольку рассматриваемая функ-

ция остается ограниченной. Выполнение указанного условия обеспечивает сходимость численного решения МКЭ при уменьшении размеров конечных элементов (КЭ)».

С учетом представленного выше условия непрерывности сумма изменений потенциальной энергии действующих нагрузок  $dW_p$  и величины внутренней энергии деформации  $d\Lambda$  при некотором поле перемещений  $\{\delta\}$  равна нулю [7]:

$$d(\Lambda + W_p) = d\Pi = 0. \quad (1)$$

Работа действующих внешних нагрузок  $W$  равна по величине и противоположна по знаку работе внутренних сил, следовательно,

$$W_p = -W, \quad (2)$$

Энергетическое состояние деформируемой механической системы характеризуется следующим выражением [7]:

$$\Pi = \Lambda - W; \quad \frac{\partial \Pi}{\partial \{\delta\}} = 0, \quad (3)$$

где каждое из его составляющих является некоторой функцией от вектора перемещений  $\{\delta\}$ .

Согласно принципу стационарности величины  $\Pi$ , по перемещению  $\{\delta\}$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \{\delta\}} = \sum_{e=1}^E \left( \int_{V^{(e)}} [B]^T [D] [B] dV \{\delta\}^{(e)} - \{F\}^{(e)} \right) = 0, \quad (4)$$

где  $E$  – число элементов, на которое разбита область определения;  $V^{(e)}$  – объем КЭ;  $[B]^T$  – транспонированная матрица градиентов;  $[D]$  – матрица упругости;  $[B]$  – матрица градиентов (дифференцирования);  $\{\delta\}^{(e)}$  – вектор узловых перемещений

КЭ;  $\{F\}^{(e)}$  – вектор внешней эквивалентной узловой нагрузки отдельного КЭ.

Интеграл в выражении (5) определяет матрицу жесткости отдельного КЭ:

$$[K]^{(e)} = \int_{V^{(e)}} [B]^T [D] [B] dV. \quad (5)$$

Таким образом, глобальная матрица жесткости и глобальный вектор-столбец эквивалентных узловых сил можно записать в виде сумм:

$$[K] = \sum_{e=1}^E [K]^{(e)}; \{F\} = \sum_{e=1}^E \{F\}^{(e)}, \quad (6)$$

которые в матричном виде составляют общее уравнение равновесия рассматриваемой механической системы в целом:

$$[K]\{\delta\} = \{F\}. \quad (7)$$

Формирование глобальной матрицы жесткости  $[K]$  осуществляется суммированием из отдельных матриц элементов (метод прямых жесткостей) с использованием топологической информации, которая представляет собой некоторый список номеров узлов, полученных из глобальной нумерации конечно-элементной модели объекта.

Формирование вектора сил  $\{F\}$  осуществляется по номенклатуре и топологии тех областей конечно-элементной модели, где эти нагрузки определены [7].

В результате решения глобальной системы алгебраических уравнений (7) имеем некоторое поле перемещений, представленное в узловых точках значениями компонент глобального вектор-столбца перемещений  $\{\delta\}$  [7].

Из основных видов КЭ, которые используются для моделирования различных машиностроительных конструкций и расчета их напряженно-деформированного состояния в объемной постановке, наибольшее распространение получил 8-узловой изопараметрический гексаэдр (рис. 1) [7].

Как указывается в работе [3, 7], без учета ограничений, связанных с первым порядком аппроксимации, данный тип КЭ позволяет оценить общее число НДС объекта исследования с относительно небольшими ресурсными затратами. В нашем случае объектом исследования является сборная конструкция «шпиндель-инструментальная оправка» на основе профильного соединения.

Общее решение задачи включало несколько этапов, а именно: разработку геометрических моделей деталей сборной конструкции; шпинделя, конического хвостовика инструментальной оправки; построение конечно-элементной модели; моделирование сопряжения деталей сборной конструкции шпиндельного узла, граничных условий, нагрузки; анализ полученных результатов расчета.

#### 4. ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

На основе методики компьютерного моделирования для оценки НДС, предложенной в работе [8, 11], проведен численный анализ для трех геометрических моделей конического разъемного профильного соединения с равноосным контуром. Эскиз сборной единицы показан на рис. 2.

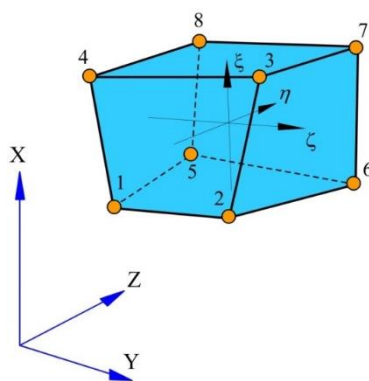


Рис. 1. Конечный элемент в виде изопараметрического гексаэдра  
 Fig. 1. Isoparametric hexahedron finite element

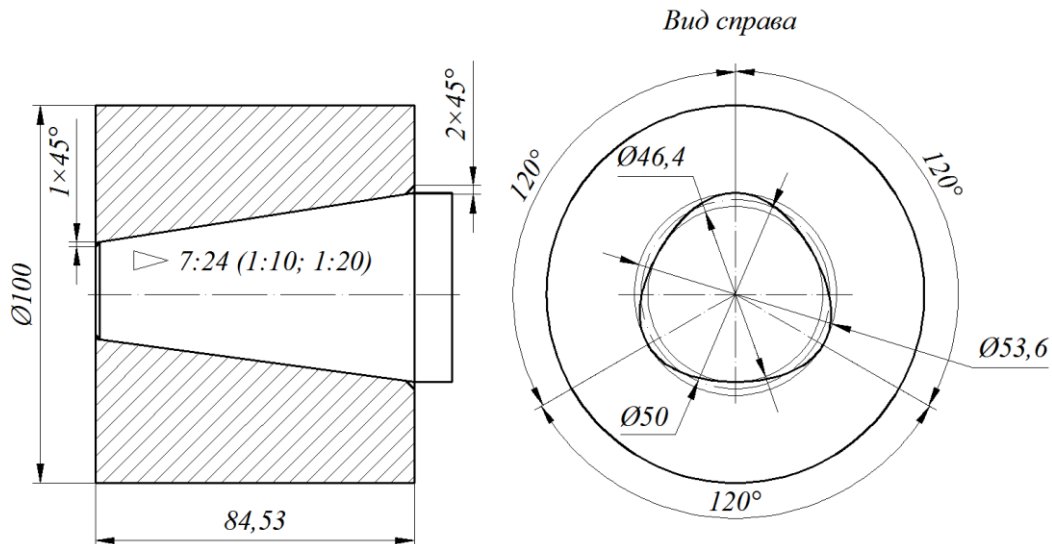


Рис. 2. Шпиндель-инструментальная оправка  
Fig. 2. Spindle-instrumental mandrel

Построение геометрической модели основывается на известном уравнении равноосного контура [10], с применением которого получен набор координат точек сплайна со средним диаметром 50 мм (рис. 3).

Координаты точек получены в текстовом структурированном файле, а автоматизированное построение сплайна выполнено в процессоре NX 9.0 с помощью команды «Сплайн по точкам – Точки из файла».

На рис. 4 показаны модели инструментальных оправок с профильным коническим хвостовиком, выполненных с конусностью 7:24, 1:10 и 1:20 по двум контрольным сечениям в каждой модели, при этом в малом основании конуса оправки выполняется

фаска 1x45°, а в большем основании выполняется вылет длиной 10 мм.

При моделировании шпинделя для каждой модели создается цилиндр диаметром 100 мм и высотой 84,53 мм, отвечающий реальным размерам конструкции шпиндельного узла многоцелевого станка (см. рис. 2). Из полученного цилиндра булевой операцией вычитания удаляется материал, соответствующий геометрической форме хвостовика инструментальной оправки рассматриваемой конусности. На профильном коническом отверстии шпинделя большего диаметра выполняется фаска 2x45°. Шпиндели различных моделей в разрезе показаны на рис. 5.

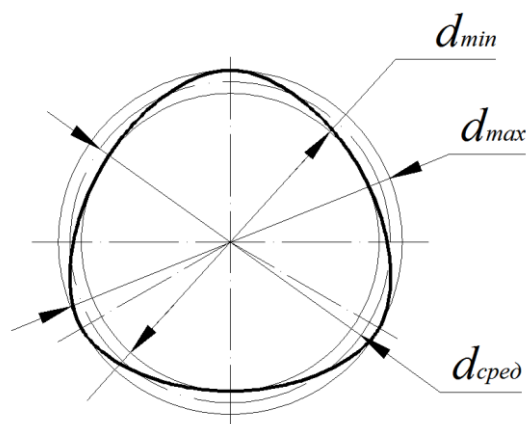


Рис. 3. Вид профильной кривой с равноосным контуром (ПК-3 профиль)  
Fig. 3. Type of a profile curve with an equiaxial contour (RK-3 a profile)



Рис. 4. Модели конических хвостовиков оправок с равноосным контуром посадочной поверхности  
Fig. 4. Models of conical shank mandrels with an equiaxial contour of a mounting surface



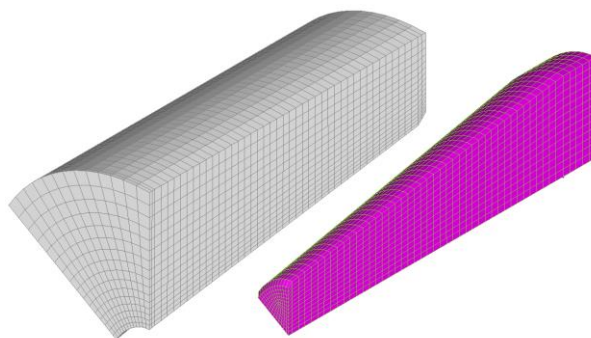
Рис. 5. Модели шпинделей с коническими профильными посадочными отверстиями с равноосным контуром  
Fig. 5. Models of spindles with conical profile mounting openings with an equiaxial contour

Следующим шагом является выполнение конечно-элементного анализа геометрических моделей деталей сборной конструкции шпинделя.

## 5. КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНАЯ МОДЕЛЬ СОЕДИНЕНИЯ

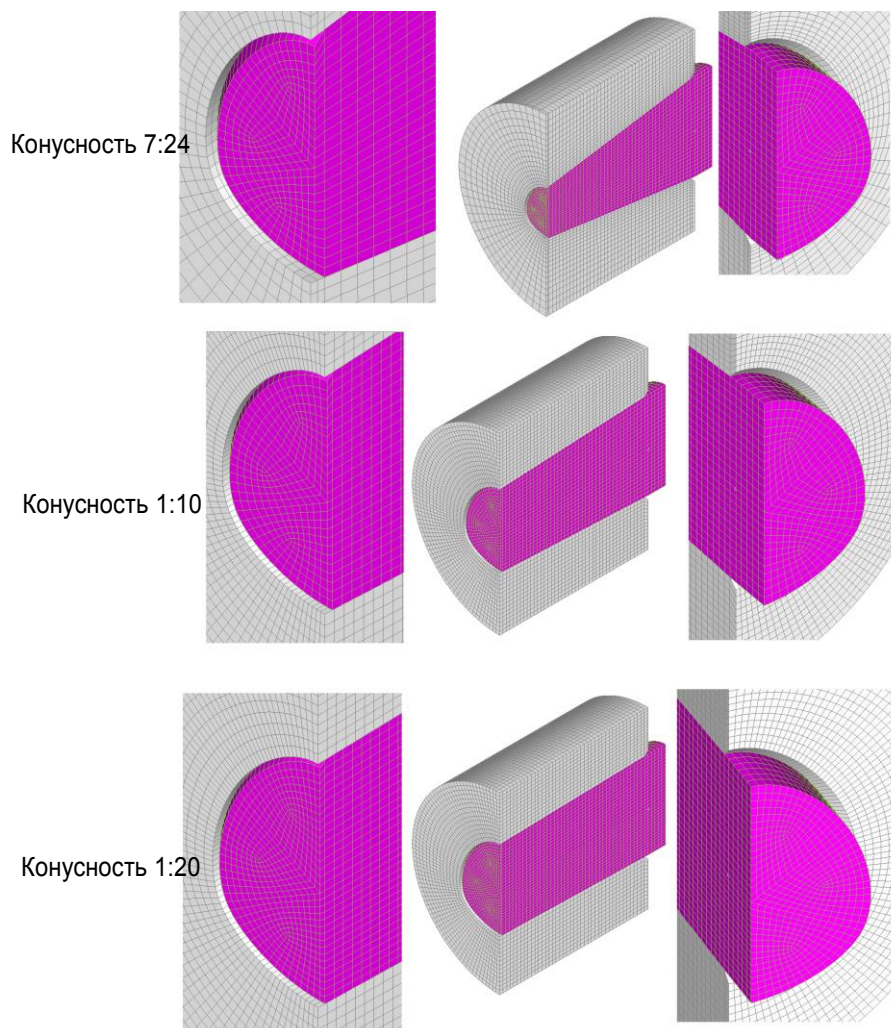
Для построения конечно-элементной модели соединения используется свойство циклической симметрии геометрической модели. Основным типом КЭ для моделирования конструкции оправки и шпинделя, а также расчета параметров напряженно-деформированного состояния выбран изопараметрический гексаэдр (CHEXA) (см. рис. 1). Это позволяет учесть специфику геометрии исследуемых деталей, значительно повысить точность расчета и уменьшить затраты времени при меньшем количестве КЭ и узлов.

Учитывая производственную практику применяемых материалов для изготовления деталей соединения (материал шпинделя – сталь 40Х, 20Х, 12ХН3А; материал инструментальных оправок SK, SW – сталь 40Х, 20Х, 18ХГТ), при моделировании используются усредненные физико-механические характеристики сталей, а также их усредненная плотность.



**Рис. 6. Конечно-элементные модели секторов хвостовика оправки и шпинделя**  
**Fig. 6. Finite element models of mandrel shank and spindle sectors**

Генерирование конечно-элементной сетки производится только на одном секторе оправки и шпинделя в полуавтоматическом режиме, при этом средний размер конечного элемента принят равным 2 мм, в то время как образование сетки на остальных частях модели воспроизводится методами копирования и отражения. Конечно-элементные модели сборной конструкции шпиндельного узла всех разновидностей представлены на рис. 7.



**Рис. 7. Конечно-элементные модели сборной конструкции шпиндельного узла на основе конических профильных соединений**

**Fig. 7. Finite element models of the modular design of the spindle assembly on the basis of conical profile joints**

Общее количество КЭ в каждой готовой модели конструкции составляет приблизительно 98000 элементов, что соответствует требованиям сходимости при численном методе решения задачи.

## 6. СОПРЯЖЕНИЯ, ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ, НАГРУЗКИ

Для более точного моделирования сопряжения криволинейных посадочных поверхностей «шпиндель-оправка» используется метод контакта сегмент-сегмент [12–14].

При определении условий контактного взаимодействия считается, что работа соединения происходит в условиях сухого трения, устанавливается параметр «нулевого начального проникновения» (от англ. «Zero Gap/Penetration»). Это позволяет устранить зазоры и натяги, возникающие при построении конечно-элементной сетки. Расположение контактных поверхностей задается по геометрическим моделям оправки и шпинделя. Контактные поверхности создаются отдельно для рабочей поверхности каждой детали и ее фаски.

Для задания граничных условий вводится дополнительная цилиндрическая система координат. Расчетная схема нагружения неподвижного разъемного соединения и связи (граничные условия) представлены на рис. 8. При данной расчетной схеме сохра-

няется подвижность узлов в радиальном направлении, поэтому шпиндель имеет возможность изменять размер поперечного сечения при возникновении распорных усилий в соединении.

Необходимо отметить, что граничные условия на узлы оправки не задаются. При сборке соединения подвижность оправки ограничивается геометрической формой продольного и поперечного сечений отверстия в шпинделе.

При идеализации геометрической формы деталей сопряжения можно сделать допущение, что конусность обеспечивает только одностороннюю связь. Как известно, величина угла уклона и угол трения определяют вторую связь, что во многом определяет возможность разъема соединения. В нашем случае перемещению оправки в противоположном направлении препятствует некоторая (малая) величина тангенциальной контактной жесткости, необходимая для устойчивости решения (для положительного определения глобальной матрицы жесткости). Величина этой жесткости рассчитывается решателем и обычно принимается на несколько порядков меньше, чем жесткость в узлах контактирующих конечных элементов. Автоматический подбор параметров штрафной контактной жесткости на примере типа контакта «узел-в-узел» рассматривается в работах [3, 4].

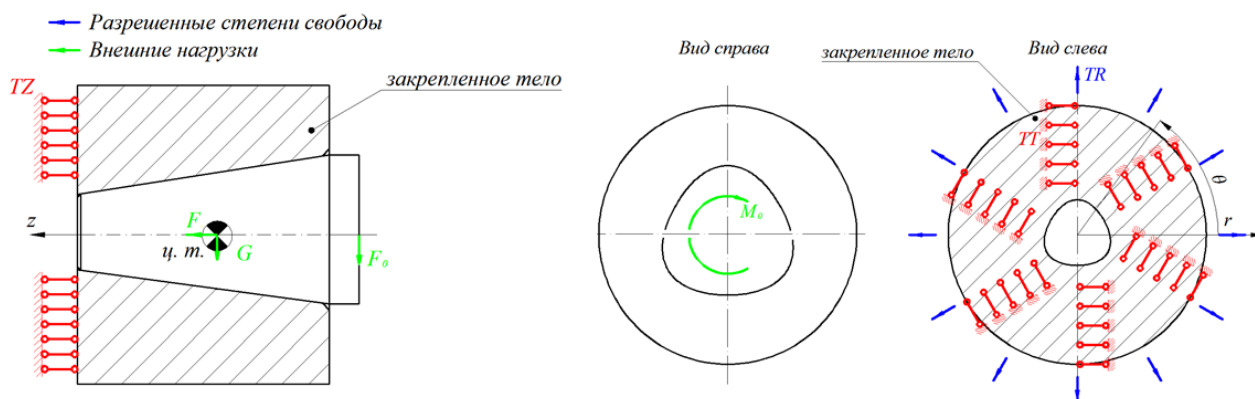


Рис. 8. Расчетная схема нагружения конического разъемного профильного соединения шпиндельного узла  
Fig. 8. Design loading scheme of conical detachable profile connection of the spindle assembly



Согласно принятой схеме нагружения задаются возможные варианты внешних нагрузок (таблица).

К инструментальной оправке прикладывается осевая сила  $F_S$ , определяющая схему фиксации конического соединения по величине сборочной силы; радиальная сила  $F_0$ , определяющая величины сил резания и крутящий момент  $M_0$ .

Силы прикладываются к геометрии (а не к узлам), поэтому функция пересчета общей нагрузки на узловые силы возлагается на препроцессор.

Применение МКЭ позволило определить параметры НДС сборной конструкции «шпиндель-оправка» при контактом взаи-

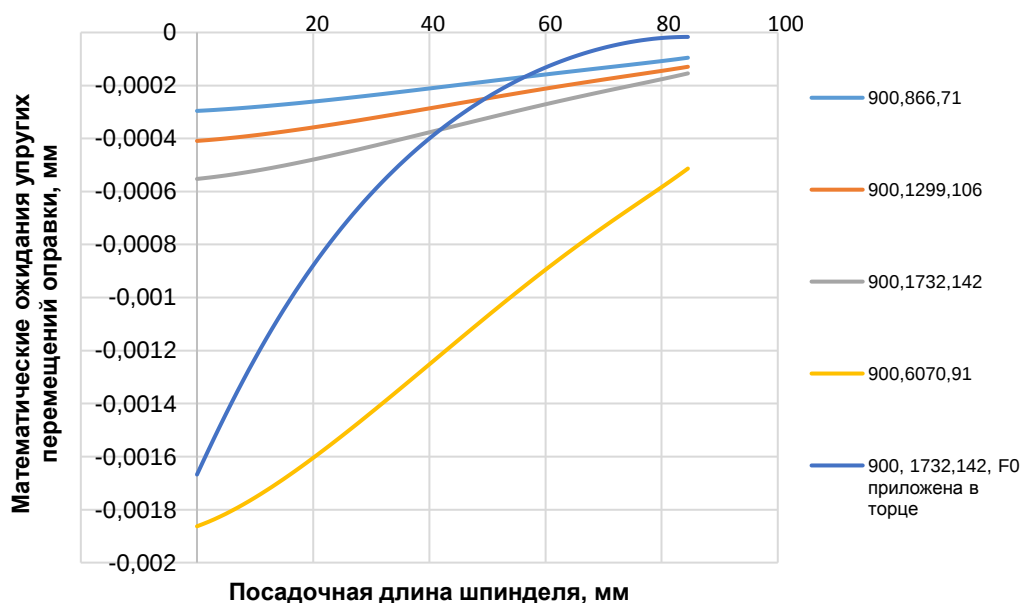
модействии, а также величины упругих перемещений инструментальной оправки для разных условий ее нагружения.

На диаграммах (рис. 9, 10) показаны математические ожидания упругих перемещений инструментальной оправки соединений для исследуемых величин сборочных сил и внешних нагрузок при конусности 1:10 и 7:24. Расчетами установлено, что упругие перемещения инструментальной оправки лежат в пределах от 1,4 мкм до 1,8 мкм.

Как показывает сравнительный анализ величин упругих перемещений, при заданных конструктивных параметрах соединения и величинах предельных внешних нагрузок, максимальные перемещения не превышают допускаемые.

**Числовые значения внешних нагрузок**  
**Numerical values of external loadings**

| №        | Степень нагружения | $F_{01}, M_{01}$ | $F_{02}, M_{02}$   | $F_{03}, M_{03}$   | $F_{04}, M_{04}$  |
|----------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| $F_{S1}$ | 500 Н              | 866 Н;<br>71 Н·м | 1299 Н;<br>106 Н·м | 1732 Н;<br>142 Н·м | 6070 Н;<br>91 Н·м |
| $F_{S2}$ | 700 Н              | 866 Н;<br>71 Н·м | 1299 Н;<br>106 Н·м | 1732 Н;<br>142 Н·м | 6070 Н;<br>91 Н·м |
| $F_{S3}$ | 900 Н              | 866 Н;<br>71 Н·м | 1299 Н;<br>106 Н·м | 1732 Н;<br>142 Н·м | 6070 Н;<br>91 Н·м |



**Рис. 9. Диаграмма математических ожиданий упругих перемещений оправки по длине посадочной поверхности шпинделя при конусности 1:10, мм**

**Fig. 9. Mathematical expectation diagram of mandrel elastic displacements along the length of the spindle mounting surface with a taper of 1:10, mm**

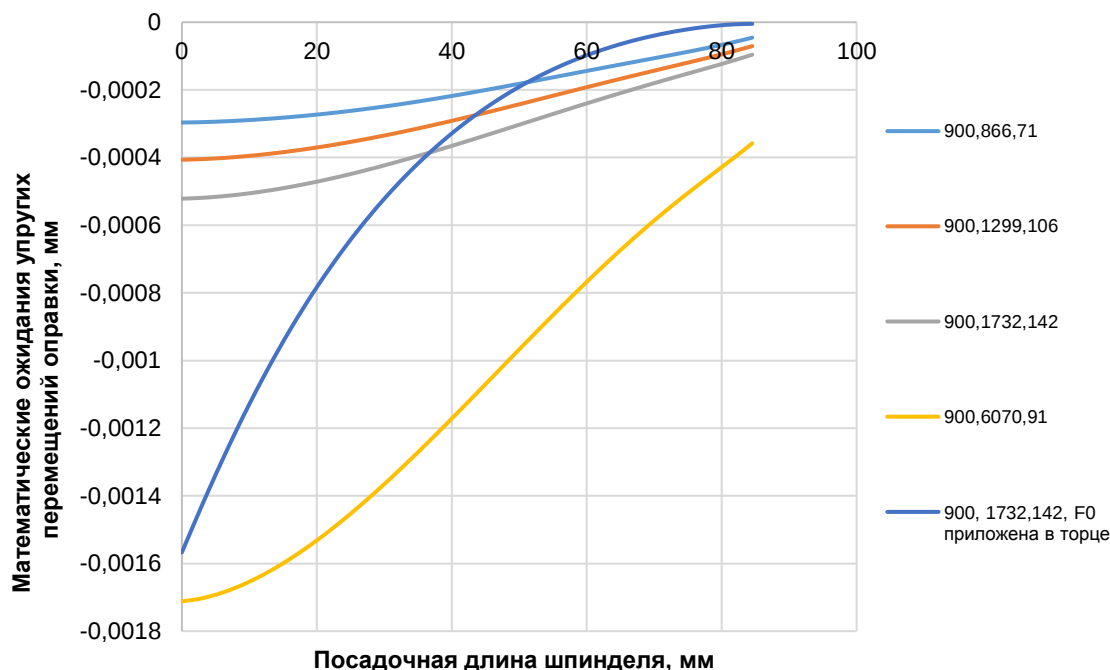


Рис. 10. Диаграмма математических ожиданий упругих перемещений оправки по длине посадочной поверхности шпинделя при конусности 7:24, мм

Fig. 10. Mathematical expectation diagram of mandrel elastic displacements along the length of the spindle mounting surface with a taper of 7:24, mm

При анализе НДС конического РК-3 профильного соединения были рассчитаны величины окружных, нормальных и радиальных напряжений, возникающих в зонах контактного взаимодействия, а также в теле оправки и шпинделя. Как показал анализ НДС конических РК-3 профильных соединений, при конусности 1:10 окружные напряжения растяжения до 21% меньше, а окружные напряжения сжатия до 33% меньше в сравнении с конусностью 7:24. Радиальные напряжения от 11,7 до 78,3% меньше для конусности 1:10 в сравнении с конусностью 7:24. Расчет значений нормальных напряжений показал, что нормальные напряжения сжатия для конусности 1:10 на 6,4% меньше, а нормальные напряжения растяжения на 9,4% больше для конусности 1:10 в сравнении с конусностью 7:24 при предельных значениях внешней нагрузки. Проверочные расчеты окружных, нормальных и радиальных напряжений показали, что их величины не превышают допускаемые 326, 6 МПа для термически обработанных сталей.

Работоспособность соединения «шпиндель-инструментальная оправка» с

конусностью 1:10, 7:24 сохраняется, если оно эксплуатируется при силе закрепления 900 Н для величин передаваемых радиальных нагрузок от 866 Н до 1732 Н и величин крутящего момента от 71 Н·м до 142 Н·м соответственно. Результаты расчетов профильных соединений при конусности 1:20 в статье не приведены.

## 7. ВЫВОДЫ

1. Расчетами установлено, что величины математических ожиданий упругих перемещений в коническом разъемном профильном соединении «шпиндель-инструментальная оправка» не превышают 1,8 мкм для конусности 1:10, 7:24 при силе закрепления оправки равной 900 Н в условиях статического нагружения.

2. Величины математических ожиданий упругих перемещений оправки по длине посадочной поверхности шпинделя изменяются нелинейно и достигают предельных значений в крайних сечениях.

3. Конструктивное выполнение фасок в профильном отверстии шпинделя поз-



воляет до 4-х раз уменьшить величины максимальных нормальных контактных напряжений, в противном случае наблюдается

концентрация напряжений в крайнем сечении большого основания конуса профильного отверстия до 30,84 МПа.

### Библиографический список

1. Аверьянов О.И., Аверьянова О.И. Модульный принцип построения многоцелевых станков с ЧПУ. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 164 с.
2. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1981. 263 с.
3. Дудаев М.А., Пыхалов А.А. Контактная задача в анализе динамического поведения сборных роторов турбомашин // Вестник НГТУ. 2015. № 3(60). С. 113–129.
4. Зенкевич О.С. Метод конечных элементов в технике. М.: Мир, 1975. 542 с.
5. Ильиных В.А. Влияние конических профильных соединений на точность и жесткость технологических комплектов многоцелевых станков // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. 2018. Т. 24. № 4. С. 150–159. DOI: 10.18721 / YEST.24415.
6. Пат. № 184076, Российская Федерация. Шпиндель-инструментальная оправка на основе конического фасонного соединения / В.А. Ильиных; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения; заявл. 14.03.2018; опубл. 15.10.2018. Бюл. 29.
7. Пыхалов А.А., Милов А.Е. Контактная задача ста-

- тического и динамического анализа сборных роторов турбомашин. Иркутск: ИрГТУ, 2006. 147 с.
8. Рожкова Е.А., Ильиных В.А., Ярилов В.Е. Анализ напряженно-деформированного состояния взаимодействия деталей РК-3 профильного соединения с натягом методом конечных элементов (МКЭ) // Вестник СамГУПС. 2016. № 4(34). С. 35–41.
9. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. М.: Наука, 1979. 162 с.
10. Тимченко А.И. РК-профильные соединения и их применение в различных отраслях промышленности // СТИН. 1993. № 2. С. 13–18.
11. Пат. № 164678, Российская федерация. Глухая втулочная муфта на основе профильного конического соединения / В.А. Ильиных, В.Ю. Линеицев, Е.А. Рожкова, В.Е. Ярилов; заявитель и патентообладатель Иркутский государственный университет путей сообщения; заявл. 31.03.2016; опубл. 10.09.2016. Бюл. 25.
12. Chen Z. Finite element methods and their applications. Berlin, Germany: Springer, 2005. 411 p.
13. Crisfield M.A. Non-linear finite element analysis of solids and structures. Wiley, England: Essentials, 1996. Vol. 1-2. 360 p.
14. Cook R.D. Finite Element Modeling for Stress Analysis. New York, USA: John Wiley & Sons, 1995. 321 p.

### References

1. Aver'yanov O.I., Aver'yanova O.I. *Modul'nyj princip postroeniya mnogocelevykh stankov s ChPU* [Modular principle of CNC multi-purpose machines construction]. Staryj Oskol: TNT, 2018, 164 p. (In Russ.).
2. Voznesenskij V.A. *Statisticheskie metody planirovaniya eksperimenta v tekhniko-ekonomicheskikh issledovaniyakh* [Statistical methods of experiment planning in feasibility studies]. Moscow: Finansy i statistika Publ., 1981, 263 p. (In Russ.).
3. Dudaev M.A., Pyhalov A.A. The contact problem in the analysis of the dynamic behavior of modular turbomachine rotors. *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Scientific Bulletin of NSTU], 2015, no. 3(60). С. 113–129. (In Russ.).
4. Zenkevich O.S. *Metod konechnykh elementov v tekhnike* [Finite element method in engineering]. Moscow: Mir Publ., 1975, 542 p. (In Russ.).
5. Il'inykh V.A. Influence of conical profile connections on the accuracy and rigidity of technological sets of multi-purpose machines. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennye i inzhenernye nauki* [St. Petersburg Polytechnic University Journal of Engineering Science and Technology], 2018, vol. 24, no. 4, pp. 150–159. DOI: 10.18721 / YEST.24415.

6. Il'inykh V.A. *Shpindel'-instrumental'naya oprava na osnove konicheskogo fasonnogo soedineniya* [Spindle-tool frame based on cone-shaped connection]. Patent RF, no. 184076, 2018.
7. Pyhalov A.A., Milov A.E. *Kontaktnaya zadacha staticheskogo i dinamicheskogo analiza sbornykh rotorov turbomashin* [Contact problem of static and dynamic analysis of turbomachinery modular rotors]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2006, 147 p. (In Russ.).
8. Rozhkova E.A., Il'inykh V.A., Yarilov V.E. Analysis of the stress-strain state of RK-3 profile pressure coupling parts interaction by finite element method. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshcheniya* [Bulletin of SamGUPS], 2016, no. 4(34), pp. 35–41. (In Russ.).
9. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka Publ., 1979, 162 p. (In Russ.).
10. Timchenko A.I. RK-profile connections and their applications in various industries. *STIN*, 1993, no. 2, pp. 13–18. (In Russ.).
11. Il'inykh V.A., Linejcev V.Y., Rozhkova E.A., Yarilov V.E. Closed sleeve based on the profile conical connection. Patent RF, no. 164678, 2016.

12. Chen Z. Finite element methods and their applications. Berlin, Germany: Springer, 2005, 411 p.

13. Crisfield M.A. Non-linear finite element analysis of solids and structures. Wiley, England: Essentials, 1996,

vol. 1-2, 360 p.

14. Cook R.D. Finite Element Modeling for Stress Analysis. New York, USA: John Wiley & Sons, 1995, 321 p.

#### **Критерии авторства**

Ильиных В.А., Ярилов В.Е., Рожкова Е.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Ilinykh V.A., Yarilov V.E., Rozhkova E.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.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Ильиных Виктор Анатольевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры прикладной механики и математики,  
Забайкальский институт железнодорожного  
транспорта,  
672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11, Россия,  
e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

##### **Ярилов Виталий Евгеньевич,**

кандидат технических наук,  
исполнительный директор НО «Фонд развития»,  
Забайкальский институт  
железнодорожного транспорта,  
672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11, Россия,  
e-mail: sauron1990@bk.ru

##### **Рожкова Елена Александровна,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры подвижного  
состава железных дорог,  
Забайкальский институт  
железнодорожного транспорта,  
672040, г. Чита, ул. Магистральная, 11, Россия,  
e-mail: helenuys@mail.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Viktor A. Ilinykh,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Applied Mechanics and Mathematics,  
Trans-Baikal Institute of Railway Transport,  
11 Magistralnaya St., Chita, 672040, Russia,  
e-mail: ilinykh.viktor5@mail.ru

##### **Vitaly E. Yarilov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Executive Director of "Fund of development",  
Trans-Baikal Institute of Railway Transport,  
11 Magistralnaya St., Chita, 672040, Russia,  
e-mail: sauron1990@bk.ru

##### **Elena A. Rozhkova,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Railway Rolling Stock,  
Trans-Baikal Institute of Railway Transport,  
11 Magistralnaya St., Chita, 672040, Russia,  
e-mail: helenuys@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 620.192

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-463-471>

## Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения

© А.Г. Ларченко

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

**Резюме:** Цель исследования – создание методики определения входных параметров высокочастотного оборудования (для реализации диагностирования в режиме автоматизации), повышение качества изделий из полимерных материалов в условиях современного производства. В представленной научной работе рассматривается высокочастотный метод контроля изделий из полимерных композиционных материалов. Приводится обоснование выбора метода высокочастотного диагностирования как наиболее подходящего для проведения неразрушающего контроля. Описываются существующие проблемы технологических операций диагностирования и улучшения эксплуатационных свойств полимеров. Поставленная цель достигается путем анализа исследовательских работ, а также проведенных экспериментальных исследований в данной области. Описываются основные параметры контроля и процесс воздействия высокочастотного излучения на изделия различных форм и размеров. В работе представлены графические результаты. Создан программный комплекс, реализующий расчет параметров диагностирования изделий в режиме автоматизации, описываются результаты экспериментальных исследований с целью подтверждения выдвинутых гипотез и принятых математических решений выбора входных параметров. Была создана методика определения и установки главных параметров высокочастотного оборудования с целью реализации диагностирования и повышения эксплуатационных свойств в режиме автоматизации.

**Ключевые слова:** машиностроение, диагностирование, контроль, высокочастотное излучение, высокочастотное оборудование, полимер

**Информация о статье:** Дата поступления 28 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 13 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Ларченко А.Г. Оценка качества изделий из полимерных материалов машиностроительного назначения. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):463–471. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-463-471

## Quality assessment of products from polymeric materials designed for engineering purposes

Anastasia G. Larchenko

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of this paper is to develop a methodology for determining the input parameters of high-frequency equipment in order to perform diagnostics in the automatic mode as well as to improve the quality of products made of polymeric materials under conditions of modern production. Having considered a high-frequency control method for the products from polymer composite materials the paper substantiates the choice of the high frequency diagnostic method as the most suitable for non-destructive testing. Description is also given to the existing problems of technological operations of diagnosing and improving of polymer operational properties. The set goal is achieved through the analysis of research works and conducted experimental studies in this area. The main control parameters and the process of high-frequency radiation exposure of the products of various shapes and sizes are specified. The paper presents graphic results. A software package has been created that calculates the parameters of product diagnosing in the automation mode. The results of experimental studies are provided and estimated in order to prove the hypotheses put forward and the adopted mathematical solutions for input parameter selection. A methodology has been developed for determining and setting the main parameters of high-frequency equipment in order to implement the diagnosing and improve operational properties in the automation mode.

**Keywords:** mechanical engineering, diagnostics, control, high-frequency radiation, high-frequency equipment, polymer

**Information about the article:** Received February 28, 2019; accepted for publication March 13, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Larchenko A.G. Quality assessment of products from polymeric materials designed for engineering purposes. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):463–471. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-463-471

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в машиностроительной отрасли значительно изменилась функция полимерных композиционных материалов. Использование полимеров позволяет решать все более сложные задачи. С каждым годом композиционные материалы улучшают свои механические свойства и активно используются для изготовления конструктивно сложных крупногабаритных деталей [1, 2]. В машиностроении появились полиамидные сепараторы, втулки подвески тормозного башмака боковой рамы, демпферы скользуна тележки, упруго-катковые скользуны-демпферы, износостойкие вставки адаптера кассетной буксы, накладки фрикционного клина.

Повышенный уровень технологических операций диагностирования обеспечивает высокое качество изделий из полимерных материалов при изготовлении и в ходе выполнения ремонтных работ, но трудоемкость некоторых методов контроля весьма велика, а в некоторых случаях достигает более 15% от общих трудозатрат. Кроме этого, не все существующие методы контроля позволяют в полной мере выявить разнородные дефекты сложного характера, возникающие вследствие несовершенства технологических процессов, а также при воздействии эксплуатационных факторов, что, в свою очередь, приводит к значительным экономическим потерям, непредвиденному расходу запасных частей, снижению качества выпускаемой продукции, а в некоторых случаях и к аварийным ситуациям.

В соответствии с проведенным литературно-патентным обзором, одним из путей решения задач диагностирования полимерных изделий является использование радиофизического метода контроля, основанного на непрерывном воздействии проникающего высокочастотного электрического поля. В результате присутствующей поляризации в процессе контроля изделие

нагревается, а в местах нарушения сплошности материала появляется скачкообразное увеличение электрической проводимости (микроразряды). Данный метод позволяет выявлять дефекты без механического воздействия, восстанавливать свойства полимерных изделий, снижать время и затраты на испытания [3–6]. Но, несмотря на внушительную практическую значимость метода, оборудование для реализации процесса контроля токами высокой частоты на современном рынке представлено в очень ограниченном количестве, а вопросы определения входных параметров электротермических устройств при осуществлении автоматизированного управления остаются открытыми [7–9]. Исходя из вышесказанного, была поставлена цель создания методики определения входных параметров высокочастотного оборудования для реализации управления процессом диагностирования в режиме автоматизации и повышения качества изделий из полимерных материалов в условиях производства.

## 2. УСТРОЙСТВО ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРОВ. СОЗДАНИЕ МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Для достижения поставленной цели необходимо было произвести ряд теоретических и экспериментальных исследований. Изучения проводились на запатентованном в рамках научной работы устройстве диагностирования изделий из полимерных композиционных материалов (рис. 1), основными элементами которого являются: рабочий конденсатор (1), таймер (2), привод (3), генератор высокочастотного излучения (4), регулятор конденсатора переменной емкости (5), блок автоматизации (6), переменный конденсатор (7), фидер (8). Основные характеристики, принцип работы, а также сопутствующее программное обеспечение представлены в исследованиях [10–15]. Со-



гласно полученным экспериментальным результатам и теоретическим данным, основным входным параметром процесса диагностирования (применительно к разработанному устройству) является мгновенная потребляемая мощность, которая зависит от двух составляющих – удельной мощности и объема контролируемого изделия [13]. При диагностировании объектов контроля различной геометрической формы необходимо сохранить условие неизменности зависимости мгновенной потребляемой мощности  $P_{\text{МПМЭ}}$  от времени воздействия высокочастотного излучения. Отсюда процесс воздействия можно представить в следующем виде [3]:

$$P_{\text{МПМЭ}} = P_{\text{МПМ}}, \quad (1)$$

$$\left( 5,53 \cdot 10^{-11} \left( \frac{U_3}{d_3} \right) \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \right) \cdot V_3 = \\ = \left( 5,53 \cdot 10^{-11} \left( \frac{U}{d} \right) \cdot f \cdot \varepsilon' \cdot \text{tg} \delta \right) \cdot V, \quad (2)$$

где  $U_3$  – напряжение эталонного изделия, В;  $U$  – напряжение объекта контроля, В;  $d_3$  – высота эталонного изделия, мм;  $d$  – высота

объекта контроля, мм;  $f$  – частота поля, Гц;  $\varepsilon'$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\text{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь;  $V_3$  – объем эталонного изделия, мм<sup>3</sup>;  $V$  – объем объекта контроля, мм<sup>3</sup>.

Согласно алгебраическим преобразованиям,

$$\left( \frac{U_3}{d_3} \right) \cdot V_3 = \left( \frac{U}{d} \right) \cdot V. \quad (3)$$

Исходя из вышеизложенного,

$$U = \sqrt{\frac{31242,706 \cdot d}{S}}. \quad (4)$$

Для реализации процесса контроля изделий необходимо установить напряжение на обкладках рабочего конденсатора в соответствии с выражением 4. Установка напряжения на устройстве диагностирования осуществляется переменным конденсатором (рис. 2), состоящим из двух токопроводящих пластин (2, 3), одна из которых (2), вращаясь в зависимости от регулятора емкости (1), изменяет угол относительно другой (3).

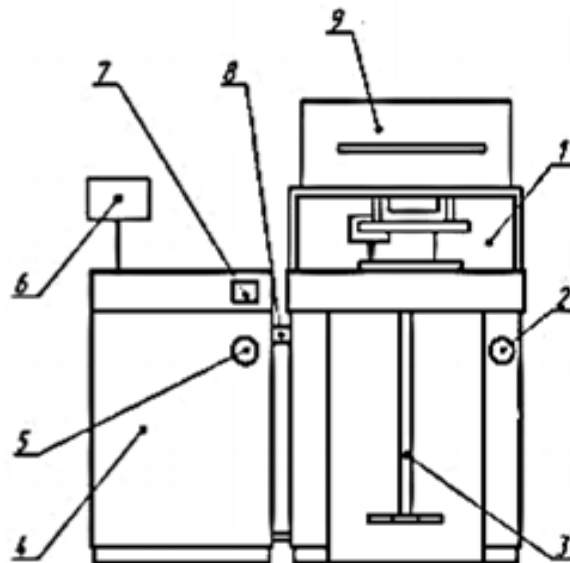


Рис. 1. Схема устройства контроля полимерных изделий машиностроительного назначения  
Fig. 1. Diagram of the control device of polymer products designed for engineering purposes

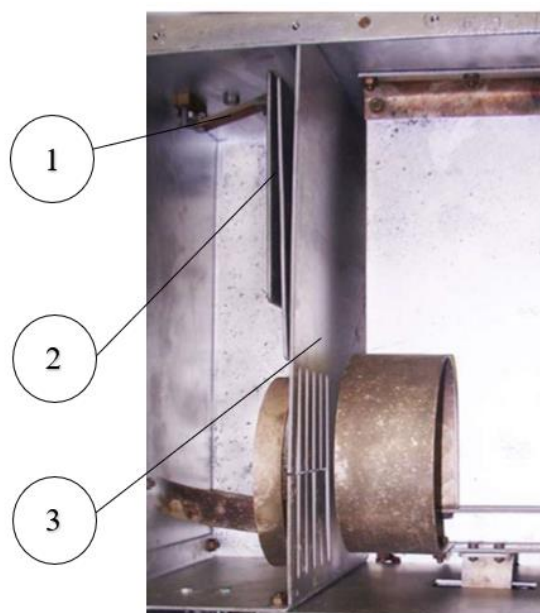


Рис. 2. Конденсатор переменной емкости устройства диагностирования полимерных изделий  
 Fig. 2. Continuously adjustable capacitor of the diagnostic device for polymer products

Необходимо отметить, что с изменением угла между пластинами емкость рабочего конденсатора изменяется нелинейно. Максимальное значение емкости достигается при минимальном значении угла наклона, что, в свою очередь, соответствует максимальному значению напряжения. Максимальное напряжение равно значению 4000 В, при емкости равной 105 пФ [3]. Минимальное расстояние между пластинами составляет 3 мм, угол поворота варьируется от 0 до 15°. Для удобства расчета пластины конденсатора были разбиты на элементарные поверхности. Ширина простейшего конденсатора на высоте 0–45 мм равна 110 мм, при высоте от 45–230 составляет 165 мм. Емкость переменного конденсатора соответствует выражению:

$$C_{н.к.} = \sum_{i=1}^{230} \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot b_i}{d + l_i \cdot \operatorname{tg} \alpha}, \quad (5)$$

где  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость;  $l_i$  – расстояние до  $i$ -го конденсатора мм;  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная;  $d$  – расстояние между пластинами мм;  $b$  – ширина конденсатора мм;  $\alpha$  – угол поворота.

На рис. 3. представлены графиче-

ские результаты расчетной зависимости емкости от угла поворота подвижной пластины. Исходя из графика, следует вывод о том, что чем меньше угол между токопроводящими пластинами, тем выше значение емкости.

Важно учесть, что конденсатор в цепи переменного тока обладает реактивным сопротивлением, изменяющимся в зависимости от частоты переменного тока:

$$R_c = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (6)$$

Так как с изменением положения подвижной пластины конденсатора изменяется емкость, из выражения (3) была определена зависимость напряжения от угла поворота [3].

Данные расчеты и графики позволяют контролировать изделия различной формы и размеров в течение установленного периода. Оптимальное время контроля (исходя из экспериментальных данных) составляет 111 с [13]. Данное время позволяет выявлять дефекты различного рода и проводить диагностирование без структурных и фазовых изменений.

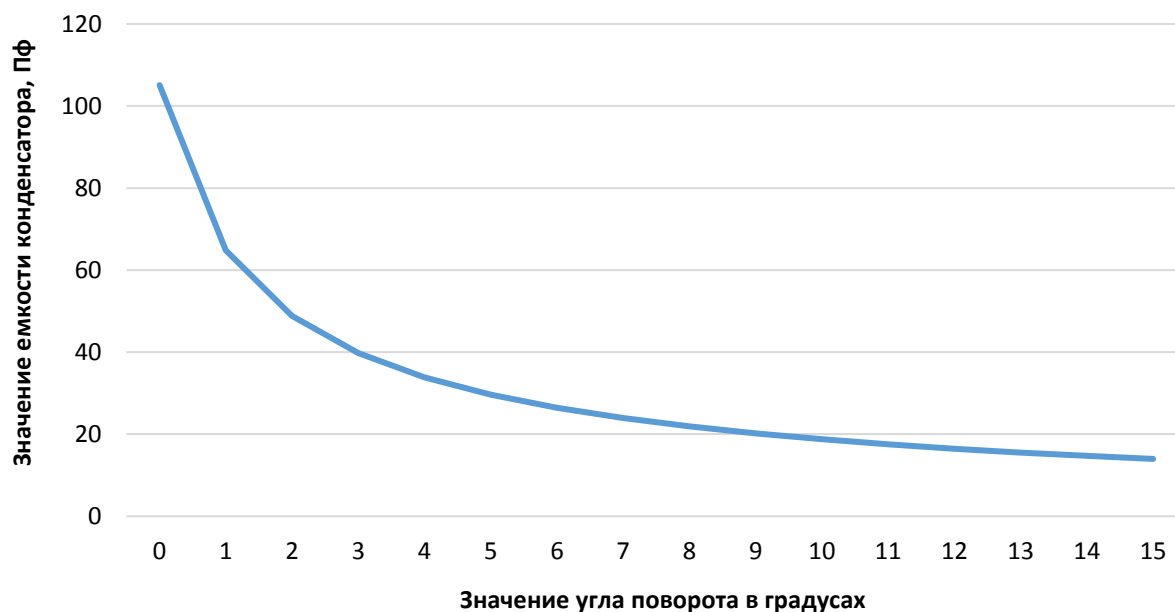


Рис. 3. Зависимость емкости от угла между токопроводящими пластинами  
Fig. 3. Dependence of capacitance on the angle between the conductive plates

### 3. ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ALEO-DIAGNOST. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ. ОЦЕНКА РЕЗУЛЬТАТОВ

Для удобства расчетов и установки параметров диагностирования в рамках исследования был разработан и зарегистрирован программный комплекс Aleo-Diagnost. Алгоритм использования программного комплекса представлен на рис. 4.

Использование полученных результатов и программного комплекса значительно упрощает организацию процесса диагностирования в режиме автоматизации, а также допускает исследование процесса воздействия высокочастотного излучения на изделия различной конфигурации с целью улучшения качества изделий и восстановления эксплуатационных свойств. Непосредственно для исследования процесса воздействия высокочастотного поля и изучения возможностей программного комплекса в работе были рассмотрены изделия различной конфигурации. Для каждого изделия были найдены параметры диагностиро-

вания в режиме автоматизации. Полученные данные говорят о том, что с увеличением высоты контролируемых изделий возрастает рабочее напряжение и уменьшается удельная потребляемая мощность, но, если высота остается постоянной, а изменяются другие геометрические параметры (например, диаметр), то рабочее напряжение и удельная мощность изменяются в меньшую сторону. Для подтверждения расчетов и выдвинутых гипотез была проведена серия экспериментов. Исследование заключалось в обработке (диагностировании) образцов различных геометрических размеров путем воздействия электрического поля и нагрева до температуры 202°C. Геометрические параметры первой группы образцов составляли: высота – 4 мм, диаметр – 30 мм, у второй группы высота – 4 мм, диаметр, в свою очередь, – 20 мм. Эксперименты проводились на устройстве диагностирования, угол поворота (согласно методике расчета входных параметров) составляет 3°, а рабочее напряжение 1020 В. На рис. 5 представлены образцы для исследования процесса воздействия высокочастотного излучения.

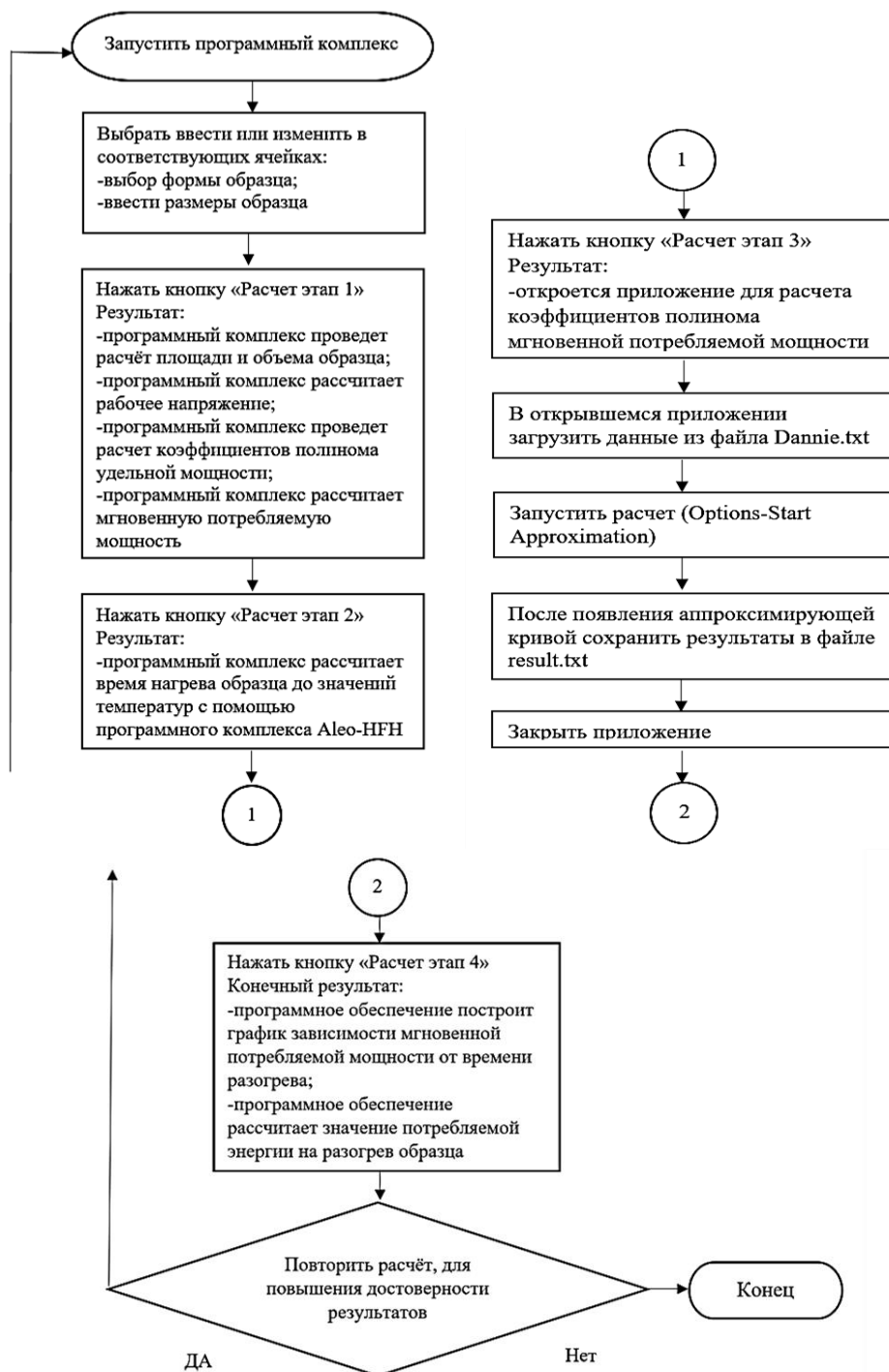


Рис. 4. Алгоритм использования комплекса Aleo-Diagnost  
Fig. 4. Algorithm of use of the Aleo-Diagnost complex



Рис. 5. Образцы для исследования  
Fig. 5. Samples for research

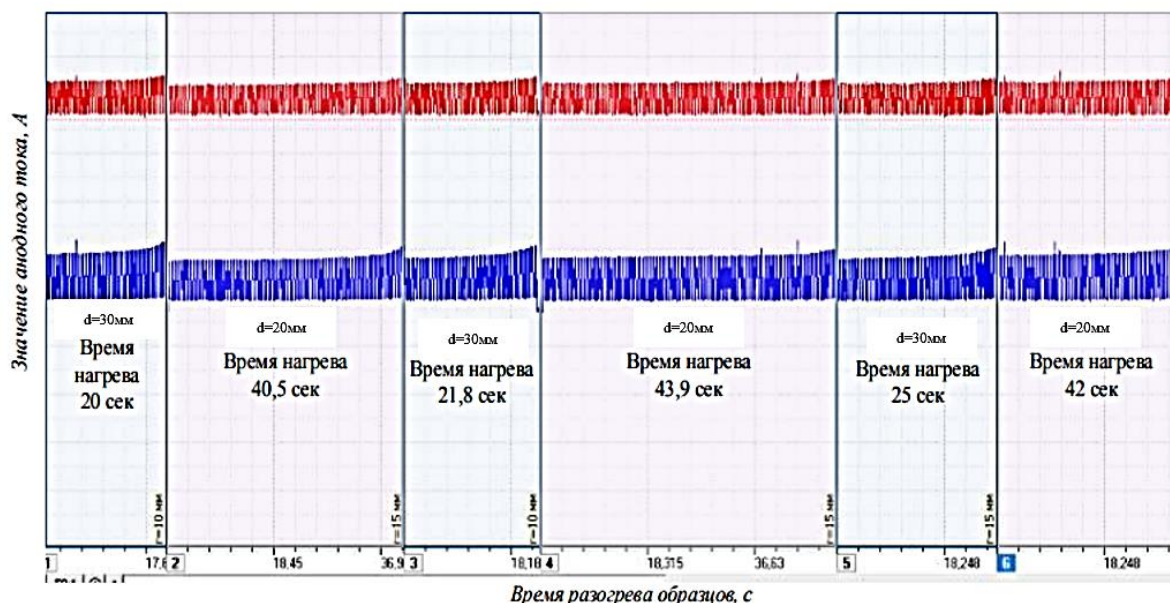


Рис. 6. Результаты нагрева образцов в процессе воздействия высокочастотного излучения  
Fig. 6. Results of heating samples when exposed to high-frequency radiation

В результате воздействия высокочастотного излучения образцы нагреваются до температуры, не приводящей к расплавлению и не влияющей на эксплуатационные свойства полимера [3], на экране монитора изображается усредненный график основного параметра диагностирования – анодного тока в зависимости от времени разогрева. Экспериментальные результаты представлены на рис. 6. По завершении практических работ была проведена статистическая обработка данных. Таким образом, первая группа образцов диагностируется за  $21,5 \pm 1,19$  с, а время для обработки образцов с диаметром 20 мм составляет  $41,7 \pm 1,34$  с. Из вышеописанного следует, что при расчетном рабочем напряжении, составляющем 1020 В с углом поворота в  $3^\circ$ , образец с меньшим радиусом нагревается

дольше, что является основанием для выбора главного, основного параметра контроля токами высокой частоты – рабочего напряжения.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Авторами разработана методика расчета и установки входных параметров электротермического оборудования для организации управления процессом контроля. Созданная методика отличается установленной математической зависимостью подачи рабочего напряжения от формы и размеров объекта контроля. Представленный метод позволяет выявить разнородные дефекты в режиме автоматизации, что существенно облегчает использование высокочастотного контроля в промышленных масштабах машиностроительной отрасли.

#### Библиографический список

1. Мантиа Ф. Вторичная переработка пластмасс / пер. с англ. Г.Е. Заикова. СПб.: Профессия, 2006. 400 с.
2. Рабек Я. Экспериментальные методы в химии полимеров / пер. с англ. В.В. Коршака. М.: Мир, 1983. 480 с.
3. Ohe T., Yoshimura Y. Microwave Irradiation onto Nylon 6 Fibers in Organic Solvent // Sen'i Gakkaishi. 2009. No. 1. P. 64–70.
4. Лившиц А.В., Филиппенко Н.Г., Каргапольцев С.К.

- Повышение эффективности высокочастотной обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 4 (32). С. 50–54.
5. Butorin D.V. Mathematical modeling of electrothermic processes on the example of high-frequency welding of the party of polymeric products // The collection includes 7th International Conference «Recent trend in Science and Technology management» by SCIEURO

(London, 27–29 July 2018). London, 2018. P. 49–59.  
6. Лившиц А.В. Математическое моделирование процессов высокочастотного нагрева термопластов и повышение качества сварных полимерных деталей // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 2 (42). С. 115–120.  
7. Филиппенко Н.Г. Математическая модель процесса высокочастотной обработки полимерных материалов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2012. № 1 (33). С. 76–79.  
8. Aiqin Hou, Xiaojun Wang, Lianghua Wu Effect of microwave irradiation on the physical properties and morphological structures of cotton cellulose // Carbonate Polymers. 2008. P. 934–937.  
9. Филиппенко Н.Г. Методика автоматизации процесса электротермического нагрева полимерных материалов // Автоматизация. Современные технологии. 2017. Т. 71. № 7. С. 291–295.  
10. Пат. 132209, Российская Федерация, МПК G01N29/04. Устройство диагностики деталей из полиамидных материалов / А.Г. Ларченко, А.В. Лившиц, С.И. Попов, Н.Г. Филиппенко; заявитель и патентообладатель ФГБОУ Иркутский государственный университет путей сообщения. № 2013115531/28; заявл. 10.09.2013; опубл. 10.09.2013.  
11. Ларченко А.Г. Автоматизированное выявление

дефектов в изделиях из полиамидных материалов методом высокочастотного излучения // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 41. С. 160–165.  
12. Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В., Машович А.Я. Автоматизация процесса высокочастотного нагрева материалов на промышленной установке УЗП 2500 адаптивным методом. Использование автоматизированной установки в лабораторных целях // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2011. № 2. С. 193–198.  
13. Ларченко А.Г. Автоматизированное устройство диагностирования полимерных изделий сложной конфигурации методом высокочастотного излучения // Контроль. Диагностика. 2016. № 2. С. 61–65.  
14. Филиппенко Н.Г. Системный подход к проблеме повышения эффективности автоматизированного управления процессом высокочастотной электротермии // Научная мысль. 2015. № 6. С. 43–54.  
15. Livshits A.V., Filippenko N.G., Homenko A.P., Kargapol'tsev S.K., Gozbenko V.E., Dambaev Z.G. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items // JP Journal of Heat and Mass Transfer. Pushpa Publishing House, Allahabad, India. 2017. Vol. 14. No. 2. С. 219–226.

## References

1. Mantia F. Recycling plastics, 2006, 400 p. (Russ. ed.: *Vtorichnaya pererabotka plastmass*. St. Petersburg, Profession Publ., 2006, 400 p.).  
2. Rabek J. Experimental methods in chemistry of polymers, 1983, 480 p. (Russ. ed.: *Eksperimental'nyye metody v khimii polimerov*, Moscow, Mir Publ., 1983, 480 p.).  
3. Ohe T., Yoshimura Y. Microwave Irradiation onto Nylon 6 Fibers in Organic Solvent. Sen'i Gakkaishi, 2009, no. 1, pp. 64–70.  
4. Livshits A.V., Filippenko N.G., Kargapol'tsev S.K. Improving of effective processing of high-frequency currents of polymers. *Sovremennyye tekhnologii. Sovremennyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2011, no. 4 (32), pp. 50–54. (In Russ.).  
5. Butorin D.V. Mathematical modeling of electrothermic processes on the example of high-frequency welding of the part of polymeric products. The collection includes 7th International Conference «Recent trend in Science and Technology management» by SCI-EURO (London, 27–29 July 2018). London, 2018, pp. 49–59.  
6. Livshits A.V. Mathematical modeling of high-frequency heating of thermoplastics and improvement of quality of welded polymer parts. *Sovremennyye tekhnologii. Sovremennyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2014, no. 2, pp. 115–120. (In Russ.).  
7. Filippenko N.G. Polymeric materials high-frequency processing mathematical model. *Sovremennyye tekhnologii. Sovremennyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2012, no.

1, pp. 76–79. (In Russ.).  
8. Aiqin Hou, Xiaojun Wang, Lianghua Wu Effect of microwave irradiation on the physical properties and morphological structures of cotton cellulose. Carbonate Polymers, 2008, pp. 934–937.  
9. Filippenko N.G. Automation methods of electrothermal heating of polymeric materials. *Avtomatizatsiya. Sovremennyye tekhnologii* [Automation. Modern technologies], 2017, no. 1, pp. 291–295. (In Russ.).  
10. Larchenko A.G., Livshits A.V., Popov S.I., Filippenko N.G. *Ustroystvo diagnostiki detaley iz poliamidnykh materialov* [Device for diagnosing parts made of polyamide materials]. Patent RF, no. 132209, 2013.  
11. Larchenko A.G. Automatic detection of defects in the product of polyamide materials by the method of high radiation. *Sovremennyye tekhnologii. Sovremennyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2014, no. 41, pp. 160–165. (In Russ.).  
12. Filippenko N.G., Livshits A.V., Mashovich A.YA. Automation of process of high-frequency heating of materials on the plant UZP 2500 by adaptive method. Use of the automated equipment in the laboratory purposes. *Sovremennyye tekhnologii. Sovremennyy analiz. Modelirovaniye* [Modern Technologies. System Analysis. Modeling]. 2011, no. 2 (30), pp. 193–198. (In Russ.).  
13. Larchenko A.G. Automated device diagnostics polymer products of complex configuration by high-frequency radiation. *Kontrol'. Diagnostika* [Testing. Diagnostics]. 2016, no. 2, pp. 61–65. (In Russ.).  
14. Filippenko N.G. System approach to the problem of



raising the effectiveness of automated control of high-frequency electroheat process. *Nauchnaya mysl* [Scientific Thought], 2015, no. 6, pp. 43–54. (In Russ.).

15. Livshits A.V., Filippenko N.G., Homenko A.P., Kargapoltsev S.K., Gozbenko V.E., Dambaev Z.G. Mathematical modeling of the processes of the high-frequency

heating of thermoplasts and quality improvement of welded polymeric items. *JP Journal of Heat and Mass Transfer*. Pushpa Publishing House, Allahabad, India. 2017. Vol. 14. No. 2. C. 219–226.

#### **Критерии авторства**

Ларченко А.Г. имеет на статью авторские права и несет ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Larchenko A.G. has all author's rights 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.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ**

**Ларченко Анастасия Геннадьевна,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры автоматизации  
производственных процессов,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, Чернышевского, 15, Россия,  
e-mail: larchenkoa@inbox.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHOR**

**Anastasia G. Larchenko,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Automation  
of Production Processes,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: larchenkoa@inbox.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 534.1:539.3

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-472-480>

## Разработка математических моделей для анализа чувствительности колебаний деталей машин

© И.Н. Рыжиков\*, Д.А. Еловенко\*\*, Б. Байроу\*\*\*

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

\*\*\*Бранденбургский технический университет, г. Котбус, Германия

**Резюме:** Цель – разработать математические модели и алгоритмы на основе метода конечных элементов для анализа чувствительности колебаний деталей машин и элементов конструкций к изменению проектных параметров. В работе представлен алгоритм анализа чувствительности на основе метода конечных элементов, а также результаты расчета чувствительности свободных колебаний компрессорной лопатки к изменению толщины ее профиля. Использован метод конечных элементов в перемещениях. Для решения систем линейных алгебраических уравнений используется классический метод Гаусса. В результате проведенных исследований для анализа колебаний предложен разработанный метод коэффициентов чувствительности частот. С помощью разработанных математических моделей, алгоритмов и методов проведен анализ чувствительности собственных колебаний рабочей лопатки ротора к изменению толщины профиля. Результаты расчетов показали, что погрешность прогноза частот по коэффициентам чувствительности невелика по сравнению с расчетом модифицированных моделей, что позволяет использовать коэффициенты чувствительности для оценки возможных проектов лопатки. Приведенные результаты расчетов демонстрируют достаточно малую погрешность, что позволяет применять разработанный метод анализа колебаний собственных частот с использованием коэффициентов чувствительности при оптимальном проектировании рабочих лопаток газотурбинных двигателей. Использование коэффициентов чувствительности позволяет оценить влияние изменения местной толщины профиля на спектр колебаний лопатки, что значительно повышает эффективность работ по оптимизации конструкции при ее проектировании.

**Ключевые слова:** свободные колебания, чувствительность, собственные частоты, рабочие лопатки ротора, проектирование, метод конечных элементов

**Информация о статье:** Дата поступления 6 мая 2019 г.; дата принятия к печати 31 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Рыжиков И.Н., Еловенко Д.А., Байроу Б. Разработка математических моделей для анализа чувствительности колебаний деталей машин. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):472–480. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-472-480

## Development of mathematical models for sensitivity analysis of machine part vibrations

Igor N. Ryzhikov, Denis A. Elovenco, Bernd Beirow

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Brandenburg technical University, Cottbus, Germany

**Abstract:** The purpose of the paper is to develop mathematical models and algorithms based on the finite element method to analyze the sensitivity of vibrations of machine parts and structural elements to changes in design parameters. The paper presents an algorithm for sensitivity analysis based on the finite element method, as well as the calculation results of sensitivity of compressor blade free oscillations to the changes in its profile thickness. The finite element method in displacements is used. The classical Gauss method is used to solve the systems of linear algebraic equations. As a result of conducted researches the developed method of frequency sensitivity coefficients is offered for the analysis of oscillations. Based on the developed mathematical models, algorithms and methods the analysis of the rotor blade eigen oscillation sensitivity to the changes in profile thickness is analyzed. The calculation results have shown that the error of the frequency prediction by the sensitivity coefficients is small as compared to the calculation of the modified models. Consequently, the sensitivity coefficients can be used to assess possible designs of the blade. The presented calculation results demonstrate a rather small error, which allows to apply the developed analysis method of eigen frequency oscillation using sensitivity coefficients for the optimal design of the gas turbine rotor blades. The use of sensitivity coefficients provides the

possibility to estimate the effect of the change in the local profile thickness on the blade oscillation spectrum. This significantly increases the efficiency of work on structure optimization when designing it.

**Keywords:** natural oscillations, sensitivity, eigen frequencies, rotor blades, design, finite element method

**Information about the article:** Received May 6, 2019; accepted for publication May 31, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Ryzhikov I.N., Elovenko D.A., Beirow B. Development of mathematical models for sensitivity analysis of machine part vibrations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):472–480. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-472-480

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Решение задач оптимизации является важным этапом проектирования машин и оборудования. Особое внимание при оптимальном проектировании на основе численных моделей уделяется вычислению градиентов поведения целевой функции и функции ограничений при вариации переменных проектирования (так называемой чувствительности). Для деталей машин в качестве целевой функции может выступать зависимость прочностных или вибрационных характеристик (перемещений, напряжений, частот колебаний) от геометрических или массовых параметров, являющихся переменными проектирования. Используя функцию чувствительности, проектировщик получает возможность (варьируя переменными проектирования) быстро и эффективно проводить анализ множества вариантов исходной конструкции, не прибегая при этом к трудоемким расчетам каждого из вариантов. Это позволяет в значительной степени ускорить процесс проектирования, снизить его трудоемкость. В этой связи разработка численных расчетно-оптимизационных моделей с использованием алгоритмов расчета чувствительности для анализа прочностных и вибрационных характеристик конструкций является актуальной задачей.

В качестве примера можно рассмотреть рабочую лопатку ротора газотурбинного двигателя. Благодаря своей консольной конструкции, данная деталь ротора подвержена колебаниям, характеристики кото-

рых очень чувствительны к изменениям геометрических или массовых параметров. Использование коэффициентов чувствительности позволяет значительно повысить эффективность анализа собственных частот колебаний рабочих лопаток с целью резонансной отстройки.

Разработке численных методов анализа динамики и прочности роторов турбомашин посвящено множество работ [1–22]. Также можно выделить труды, посвященные разработке методов анализа с использованием алгоритмов расчета чувствительности<sup>1</sup>.

## 2. ОСНОВНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Уравнения динамики в методе конечных элементов (МКЭ) в линейной постановке в случае свободных колебаний без демпфирования представлены следующим образом [1]:

$$[M]\{\ddot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = 0. \quad (1)$$

Решение уравнения (1) имеет вид гармонического колебания  $\delta = y \cos(\omega t - \beta)$ , где  $y$  – модальные перемещения,  $\omega$  – круговая частота,  $t$  – время,  $\beta$  – угол. Подставляя это выражение в уравнение (1), получим:

$$(\omega^2[M] + [K])\{y\} \cos(\omega t - \beta) = 0 \quad (2)$$

или

$$([K] - \lambda[M])\{y\} = 0. \quad (3)$$

<sup>1</sup>Нгуен Динь Дьонг. Математическое и программное обеспечение для анализа чувствительности параметров колебаний пластинчато-оболочечных конструкций: дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. Иркутск, 2012. 180 с. / Nguyen Dinh Dyong. Mathematical support and software for sensitivity analysis of oscillation parameters of lamellar-shell structures: Candidate's dissertation in technical sciences: 05.13.18. Irkutsk, 2012. 180 p.



где  $\lambda$  – собственное значение,  $\{y\}$  – вектор модальных перемещений (3).

Решая уравнение (3) в линейной постановке, можно определить собственные значения  $\lambda$ , модальные перемещения  $\{y\} = \{\delta\}^T = \{\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N\}^T$  (формы колебаний), где  $N$  – число степеней свободы системы, и частоты колебаний

$$\{f\} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\lambda} = \{f_1, f_2, \dots, f_N\}^T. \quad (4)$$

Чувствительность собственных значений для свободных колебаний (4, 5):

$$\frac{d\lambda}{dX_i} = \{y\}^T \left[ \frac{d[K]}{dX_i} - \lambda \frac{d[M]}{dX_i} \right] \{y\}, \quad (5)$$

где собственный вектор  $\{y\}$  нормирован как

$$\{y\}^T [M] \{y\} = -1.$$

Учитывая, что  $\lambda = (2\pi f)^2$ , выражение для вычисления чувствительности частот свободных колебаний имеет следующий вид:

$$\frac{df}{dX_i} = \frac{df}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dX_i} = \frac{1}{4\pi\sqrt{\lambda}} \frac{d\lambda}{dX_i}. \quad (6)$$

Для расчета ресурсных характеристик коэффициентов чувствительности к вариациям проектных переменных необходимо получить производную модальных перемещений или напряжений. В этом случае удобно применять понятие коэффициента влияния проектных переменных на ресурсные характеристики. Решение в случае колебаний может быть записано в виде

$$\rho = e^{-\xi\omega\Delta t} (C_1 \cos\theta + C_2 \sin\theta) + \frac{F_0}{\omega^2}; \quad (7)$$

$$C_1 = X_0 - \frac{F_0}{\omega^2}; \quad C_2 = \frac{V_0 + \xi\omega C_1}{\omega\sqrt{1-\xi^2}}; \quad \theta = \omega\sqrt{1-\xi^2}\Delta t.$$

В уравнении (7)  $\rho$  и  $\xi$  – модальные перемещения и коэффициенты демпфирования;  $X_0$ ,  $V_0$ ,  $F_0$  – начальные перемещения, скорость и силовое воздействие.

Для вычисления чувствительности динамических напряжений необходимо вы-

полнить ряд преобразований выражения МКЭ для расчета напряжений

$$\{\sigma\} = [D][B]\{\delta\}. \quad (8)$$

Для производной напряжений имеем

$$\{\sigma(t)\} = [D][B] \sum_{l=1}^n \{\delta\}_l^T P_l(t). \quad (9)$$

Производная перемещений может быть определена, как

$$\left( \frac{d\delta}{dx}(t) \right) = \sum_{l=1}^n \{\delta\}_l^T \left( \frac{dp}{dx}(t) \right)_l. \quad (10)$$

Получим окончательное выражение:

$$\left( \frac{d\sigma}{dx}(t) \right) = [D][B] \sum_{l=1}^n \{\delta\}_l^T \left( \frac{dp}{dx}(t) \right)_l = [D][B] \left[ \frac{d\delta}{dx}(t) \right]. \quad (11)$$

### 3. АНАЛИЗ КОЛЕБАНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЧАСТОТ

Чувствительность частоты к изменению толщины конструкций в узлах:

$$\partial f / \partial b = \sum_{i=1, NCN} \sum_{j=1, NE} K_f(i, j), \quad (12)$$

где  $K_f(i, j)$  – коэффициент чувствительности частоты  $f$  узла  $i$  в элементе  $j$ ;  $NCN$  – число узлов в элементе;  $NE$  – число элементов.

Большое абсолютное значение чувствительности частот означает высокую интенсивность изменения частоты при изменении толщины, положительная или отрицательная чувствительность означает, что частота уменьшится или увеличится (тенденция изменения) при изменении толщины конструкции. Можно использовать два метода для прогнозирования тенденции и интенсивности изменения каждой частоты колебания пластины. При первом методе выбирается коэффициент изменения толщины для каждого отдельного узла с соответствующими ожиданиями изменений частоты. При втором методе данный коэффициент

выбирается для каждого отдельного сечения.

Изменение частоты по методу чувствительности частот вычисляется по формуле:

$$\Delta f = \sum \sum \Delta b(i, j) \cdot K_f(i, j), i = 1, NCN; j = 1, NE, (13)$$

где  $\Delta b(i, j)$  – величина изменения толщины узла  $i$  в элементе  $j$ .

Прогнозирование частот по методу чувствительности:

$$f(b + \Delta b) = f_0 + \Delta f. (14)$$

В уравнении (14) изменение частоты:

$$\Delta f = f(b + \Delta b) - f_0, (15)$$

где  $f_0$  – частота исходной модели.

Чувствительность считается положительной, если функция имеет максимум изменений проектных параметров в верхнем диапазоне, и наоборот, – чувствительность отрицательная, если функция имеет минимум изменений в нижнем диапазоне. Чем выше численное значение чувствительности, тем в большей степени изменяется исследуемый параметр (например, частота).

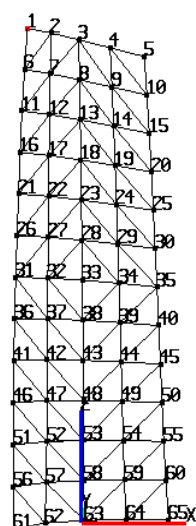


Рис. 1. Конечно-элементная модель рабочей лопатки (номера узлов, номера элементов)  
Fig. 1. Finite element model of the rotor blade (node numbers, element numbers)

Расчет коэффициентов чувствительности позволяет значительно повысить эффективность отстройки разрабатываемой конструкции от резонанса путем изменения толщины профиля.

#### 4. ЧИСЛЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведен анализ собственных частот колебаний реальной лопатки компрессора с использованием коэффициентов чувствительности. Параметры лопатки: длина  $L = 0,186$  м; хорда  $X_k = 0,167$  м; модуль Юнга  $E = 2,16 \cdot 10^5$  МПа; коэффициент Пуассона  $\mu = 0,3$ ; плотность  $\rho = 7,85 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>; радиус корневого сечения лопатки  $R_0 = 0,236$  м. Конечноэлементная модель лопатки представлена на рис. 1.

В табл. 1 приведены результаты расчета собственных частот лопатки при оборотах ротора  $n = 0, 25, \dots, 100$  1/с (рис. 2).

Распределение чувствительности частот в узлах изображено на рис. 3. Распределение чувствительности частот по сечениям лопатки изображено на рис. 4.

Проанализирована точность прогноза изменения частот колебаний лопатки при утолщении на 10% по всей поверхности лопатки либо в определенных зонах (табл. 2, 3).

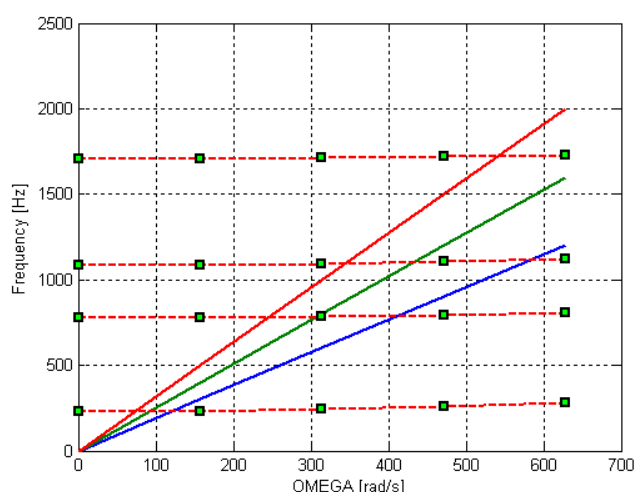


Рис. 2. Резонансная диаграмма рабочей лопатки  
Fig. 2. Resonance diagram of the rotor blade



Таблица 1

Влияние вращения на частоты собственных колебаний

Table 1

Effect of rotation on eigen frequencies

| №<br>формы | n = 0      | n = 25 1/c |                | n = 50 1/c |                | n = 75 1/c |                | n = 100 1/c |                |
|------------|------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|-------------|----------------|
|            | $f_0$ , Гц | f, Гц      | $\Delta f$ , % | f, Гц      | $\Delta f$ , % | f, Гц      | $\Delta f$ , % | f, Гц       | $\Delta f$ , % |
| 1          | 229,36     | 232,89     | 1,54           | 243,76     | 6,28           | 260,73     | 13,68          | 282,53      | 23,18          |
| 2          | 775,73     | 777,08     | 0,17           | 783,98     | 1,06           | 794,84     | 2,46           | 808,81      | 4,26           |
| 3          | 1082,62    | 1091,34    | 0,81           | 1091,34    | 0,81           | 1104,28    | 2,00           | 1122,70     | 3,70           |
| 4          | 1705,22    | 1703,34    | 0,11           | 1708,49    | 0,19           | 1716,69    | 0,67           | 1727,45     | 1,30           |

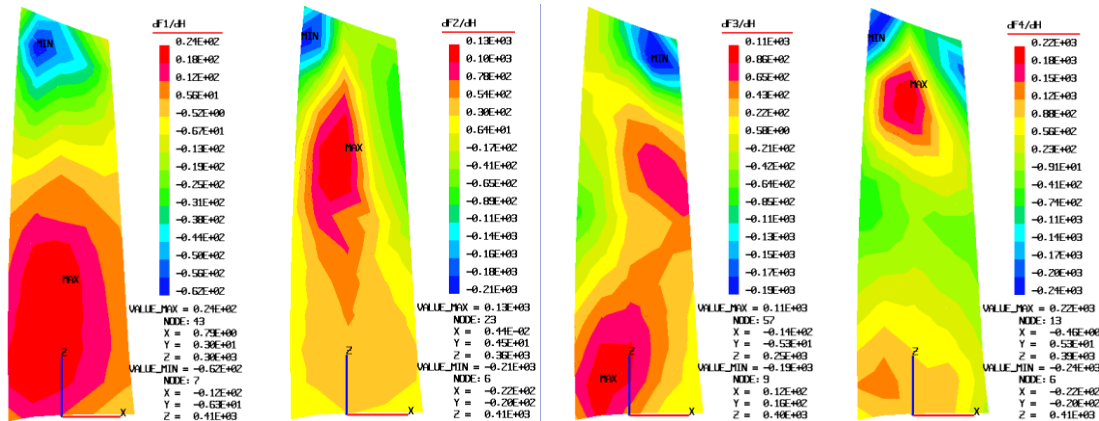


Рис. 3. Изолинии чувствительности частот для первых форм собственных колебаний

Fig. 3. Frequency sensitivity isolines for the first forms of eigen vibrations

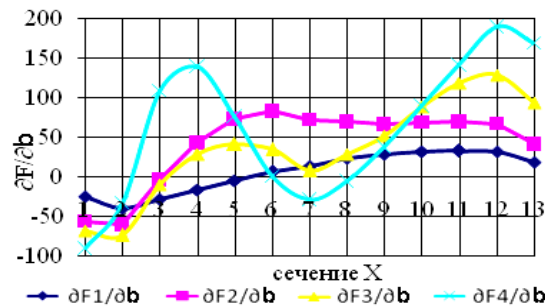


Рис. 4. Распределение чувствительности частот по сечениям лопатки

Fig. 4. Distribution of frequency sensitivity across blade sections

Таблица 2

Влияние на частоту колебаний утолщения на 10% в верхней и нижней зонах метода конечных элементов

Table 2

Effect of 10% thickening in the upper and lower zones of the finite element method on the oscillation frequency

| Форма | $f_0$ (Гц) | Утолщение в верхней зоне (узлы 1, 2, 3, 4, 5) |                  |                |
|-------|------------|-----------------------------------------------|------------------|----------------|
|       |            | МКЭ                                           | Чувствительность | $\Delta f$ (%) |
| 1     | 282,53     | 280,96                                        | 280,06           | -0,32          |
| 2     | 808,81     | 804,25                                        | 803,14           | -0,14          |
| 3     | 1122,70    | 1116,75                                       | 1115,89          | -0,08          |
| 4     | 1727,45    | 1719,18                                       | 1718,35          | -0,05          |

Таблица 3

Влияние на частоту колебания утолщения (утонения) на 10% по всей лопатке

Table 3

Effect of 10% thickening (thinning) across the whole blade on oscillation frequency

| Форма | $f_0$ (Гц) | Утолщение по всей лопатке (узлы 1, 2,...65) |                  |                |
|-------|------------|---------------------------------------------|------------------|----------------|
|       |            | МКЭ                                         | Чувствительность | $\Delta f$ (%) |
| 1     | 282,53     | 291,78                                      | 289,49           | -0,79          |
| 2     | 808,81     | 866,09                                      | 861,43           | -0,54          |
| 3     | 1122,70    | 1173,74                                     | 1169,27          | -0,38          |
| 4     | 1727,45    | 1796,37                                     | 1806,33          | 0,55           |

Таблица 4

Определение максимальной частоты лопатки при ограничениях на минимальную и максимальную толщины  $b_0 \cdot 2/3 < b < b_0 \cdot 4/3$

Table 4

Determination of the blade maximum frequency under restrictions to minimum and maximum thickness  $b_0 \cdot 2/3 < b < b_0 \cdot 4/3$

| Форма | Исходный вариант МКЭ | $F_{max}$ по $K_f$ | $\Delta F$ (%) |
|-------|----------------------|--------------------|----------------|
| 1     | 282,53               | 382,04             | 35,22          |
| 2     | 808,81               | 1115,65            | 37,94          |
| 3     | 1122,70              | 1422,72            | 26,72          |
| 4     | 1727,45              | 2159,02            | 24,98          |

Как видно из табл. 3, погрешность прогноза частот, полученных с помощью метода анализа коэффициентов чувствительности, невелика по сравнению с расчетом утолщенных и утоненных моделей, что позволяет использовать данный метод для оценки различных вариантов при оптимальном проектировании лопатки. Более актуальным (по сравнению с анализом влияния толщины в отдельных узлах с точки зрения газодинамики) является анализ влияния на колебания толщины профилей отдельных сечений лопатки.

В табл. 4 приведены максимальные частоты лопатки при ограничениях на минимальную и максимальную толщины

$$b_0 \cdot 2/3 < b < b_0 \cdot 4/3,$$

полученные с помощью метода анализа коэффициентов чувствительности.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные результаты расчетов демонстрируют достаточно малую погрешность, что позволяет применять разработанный метод анализа собственных частот колебаний с использованием коэффициентов чувствительности при оптимальном проектировании рабочих лопаток газотурбинных двигателей. Использование коэффициентов чувствительности позволяет оперативно оценить влияние изменения параметров проектирования на спектр колебаний лопатки. Это значительно повышает эффективность работ по оптимизации конструкции при ее проектировании. Другим практическим приложением моделей чувствительности может быть исследование влияния на колебания лопатки других геометрических параметров ее профиля (длина, хорда, угол установки и др.).

## Библиографический список

1. Заинчковский К.С., Репецкий О.В., Лопатин А.Б., Маликов В.Ф., Ольшевский А.Г., Персиянов В.В., Рыжиков И.Н. Автоматизация прочностных расчетов

турбомашин. Иркутск: Иркутское отделение союза НИО, 1990. 100 с.

2. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н., Нгуен Тьен Куэт.



Численное исследование динамики и долговечности рабочих колес турбомашин с расстройкой параметров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2017. № 51. С. 39–50.

3. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н., Нгуен Тьен Куэт. Компьютерный анализ ресурсных характеристик рабочих колес газотурбинных двигателей с расстройкой параметров // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника. 2018. № 53. С. 52–62.

4. Репецкий О.В., Байроу Б. Применение анализа чувствительности для исследования систем с расстройкой параметров // Байкальский Вестник ДААД. 2016. № 1. С. 86–98.

5. Репецкий О.В., Рыжиков И.Н., Schmidt R. Исследование влияния различных видов расстройки параметров на колебания и долговечность рабочих колес турбомашин // Вестник Байкальского союза стипендиатов DAAD. 2010. № 1. С. 20–31.

6. Beirow B., Giersch T., Kuehnhorn A., Nipkau J. Optimization-Aided Forced Response Analysis of a Mistuned Compressor Blisk. J. Engineering for Gas Turbines and Power. 2015. Vol. 137. P. 012504-1-012504-10.

7. Beirow B., Kuehnhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetskii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Vol. 141. January 2019. P. 11008–11008-8.

8. Repetskii O.V., Beirow B. The application of the sensitivity analysis for the study of systems with detuning parameters // Baikal Bulletin of DAAD. 2016. № 1. P. 86–98.

9. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория упругости. 2-е изд. М.: Наука, 1979. 560 с.

10. Beirow B., Giersch T., Kuehnhorn A., Nipkau J. Optimization-Aided Forced Response Analysis of a Mistuned Compressor Blisk. J. Engineering for Gas Turbines and Power. 2015. Vol. 137. P. 012504-1-012504-10.

11. Beirow B., Kuehnhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetskii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. Vol. 141. January 2019. P. 11008–11008-8.

12. Bladh J.R., Castanier M.P., Pierre C. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks. Part I: Theoretical Models // Journal of Engineering for Gas turbines and Power. January 2001. Vol. 123. No. 8. P. 89–99.

13. Castanier M.P., Pierre C. Modeling and analysis of Mistuned bladed disk vibration: Status and Emerging direction // Journal of Propulsion and power. 2006. Vol. 22. No. 2. P. 384–396.

14. Cha D., Sinha A. Effects of the nature of Excitation on the response of a Mistuned bladed disk assembly // Journal of Turbomachinery. 2002. Vol. 124. P. 588–596.

15. Cha D., Sinha A. Statistics of Response of a Mistuned bladed disk assembly subjected to white noise and narrow band excitation // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1999. Vol. 121. No. 4. P. 710–717.

16. Ewins D.J. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk // Trans. ASME, Journal of vibration, acoustics, stress and reliability in design. 1984. Vol. 106. P. 211–217.

17. Feiner D.M., Griffin J.H. Mistuning identification of bladed disks using a Fundamental mistuning model. Part I, II: Theory, Application // Journal of Turbomachinery. 2004. Vol. 126. P. 150–165.

18. Griffin J.H., Sinha A. The interaction between mistuning and friction in the forced Response of Bladed Disk Assemblies // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 1985. Vol. 107. P. 205–211.

19. Irretier H. Spectral Analysis of Mistuned Bladed Disk Assemblies by Component Mode Synthesis. Vibrations of Bladed Disk Assemblies. American Society of Mechanical Engineers. New York, 1983. P. 115–125.

20. Kaza K.R.V., Kielb R.E. Vibration and flutter of mistuned bladed-disk assemblies // Journal of Propulsion and Power. 1985. Vol. 1. No. 5. P. 336–344.

21. Mignolet M.P., Rivas-Guerra A.J. Identification of Mistuning characteristics of bladed disks from free response Data. Part I, II // Journal of Engineering for gas turbine and power. 2001. Vol. 123. P. 395–411.

22. Petrov E.P., Sanliturk K.Y., Ewins D.J. A new method for dynamic analysis of Mistuned bladed disks based on the exact relationship between tuned and Mistuned systems // Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. 2002. Vol. 124. P. 586–597.

## References

1. Zainchkovskij K.S., Repeckij O.V., Lopatin A.B., Malikov V.F., Ol'shevskij A.G., Persiyanov V.V., Ryzhikov I.N. *Avtomatizaciya prochnostnyh raschetov turbomashin* [Automation of turbomachine strength calculations]. Irkutsk: Irkutsk branch of the Scientific Research Department, 1990, 100 p. (In Russ.).

2. Repeckij O.V., Ryzhikov I.N., Nguyen Tien Quyet. Numerical investigation of dynamics and durability of bladed disc of turbomachinery with mistuning parameters. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. 2018, no. 53, pp. 52–62. (In Russ.).

2017, no. 51, pp. 39–50. (In Russ.).

3. Repetskii O.V., Ryzhikov I.N., Nguyen Tien Quyet. The computer analysis of resource characteristics of gas turbine engines bladed disks with mistuning. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin]. 2018, no. 53, pp. 52–62. (In Russ.).

4. Repeckij O.V., Bajrou B. Application of sensitivity analysis to study the systems mistuned parameters. *Bajkal'skij Vestnik DAAD* [Baikal Bulletin of DAAD]. 2016,

no. 1, pp. 86–98. (In Russ.).

5. Repeckij O.V., Ryzhikov I.N., Schmidt R. Study of the influence of different types of parameter mistuning on vibrations and durability of turbomachinery impellers. *Vestnik Bajkal'skogo soyuza stipendiatov DAAD* [Baikal Bulletin of DAAD]. 2010, no. 1, pp. 20–31. (In Russ.).

6. Beirow B., Giersch T., Kuehhorn A., Nipkau J. Optimization-Aided Forced Response Analysis of a Mistuned Compressor Blisk. *J. Engineering for Gas Turbines and Power*, 2015, vol. 137, pp. 012504-1-012504-10.

7. Beirow B., Kuehhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. January 2019, vol. 141, pp. 11008–11008-8.

8. Repetckii O.V., Beirow B. The application of the sensitivity analysis for the study of systems with detuning parameters. *Baikal Bulletin of DAAD*. 2016, no. 1, pp. 86–98.

9. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriya uprugosti* [Theory of Elasticity]. Moscow: Nauka Publ., 1979, 560 p. (In Russ.).

10. Beirow B., Giersch T., Kuehhorn A., Nipkau J. Optimization-Aided Forced Response Analysis of a Mistuned Compressor Blisk. *J. Engineering for Gas Turbines and Power*. 2015, vol. 137, pp. 012504-1-012504-10.

11. Beirow B., Kuehhorn A., Figashevsky F., Bornhorn A., Repetckii O. Forced response reduction of a blisk by means of intentional mistuning. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*. vol. 141, January 2019, pp. 11008–11008-8.

12. Bladh J.R., Castanier M.P., Pierre C. Component-Mode-Based Reduced order modeling techniques for Mistuned bladed Disks. Part I: Theoretical Models. *Journal of Engineering for Gas turbines and Power*, January 2001, vol. 123, no. 8, pp. 89–99.

13. Castanier M.P., Pierre C. Modeling and analysis of Mistuned bladed disk vibration: Status and Emerging direction. *Journal of Propulsion and power*, 2006, vol. 22,

no. 2, pp. 384–396.

14. Cha D., Sinha A. Effects of the nature of Excitation on the response of a Mistuned bladed disk assembly. *Journal of Turbomachinery*, 2002. vol. 124, pp. 588–596.

15. Cha D., Sinha A. Statistics of Response of a Mistuned bladed disk assembly subjected to white noise and narrow band excitation. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1999, vol. 121, no. 4, pp. 710–717.

16. Ewins D.J. Resonant vibration levels of a mistuned bladed disk. *Trans. ASME, Journal of vibration, acoustics, stress and reliability in design*. 1984. Vol. 106. P. 211–217.

17. Feiner D.M., Griffin J.H. Mistuning identification of bladed disks using a Fundamental mistuning model. Part I, II. Theory, Application. *Journal of Turbomachinery*, 2004. vol. 126, pp. 150–165.

18. Griffin J.H., Sinha A. The interaction between mistuning and friction in the forced Response of Bladed Disk Assemblies. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 1985. vol. 107, pp. 205–211.

19. Irretier H. Spectral Analysis of Mistuned Bladed Disk Assemblies by Component Mode Synthesis. *Vibrations of Bladed Disk Assemblies*. American Society of Mechanical Engineers. New York, 1983, pp. 115–125.

20. Kaza K.R.V., Kielb R.E. Vibration and flutter of mistuned bladed-disk assemblies. *Journal of Propulsion and Power*, 1985, vol. 1, no. 5, pp. 336–344.

21. Mignolet M.P., Rivas-Guerra A.J. Identification of Mistuning characteristics of bladed disks from free response Data. Part I, II. *Journal of Engineering for gas turbine and power*, 2001, vol. 123, pp. 395–411.

22. Petrov E.P., Sanliturk K.Y., Ewins D.J. A new method for dynamic analysis of Mistuned bladed disks based on the exact relationship between tuned and Mistuned systems. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2002, vol. 124. pp. 586–597.

#### **Критерии авторства**

Рыжиков И.Н., Еловенко Д.А. и Байроу Б. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Рыжиков Игорь Николаевич**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры машиностроительных  
технологий и материалов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: rin111@list.ru

#### **Authorship criteria**

Ryzhikov I.N., Elovenko D.A. and Beirow B. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Igor N. Ryzhikov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Engineering  
Technologies and Materials,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: rin111@list.ru



**Еловенко Денис Александрович,**  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры конструирования и стандартизации  
в машиностроении,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: elovenko03@gmail.com

**Бернд Байроу,**  
доктор,  
профессор кафедры структурной механики  
и динамики транспортных систем,  
Бранденбургский технический университет,  
03046, г. Котбус, Сименс-Хальске Ринг, 14, Германия,  
e-mail: beirow@b-tu.de

**Denis A. Elovenko,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Design  
and Standardization in Mechanical Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,

**Bernd Beirow,**  
PhD,  
Professor of the Department of Structural Mechanics  
and Dynamics of Transport Systems,  
Brandenburg technical University,  
14 Siemens-Halske Ring, Cottbus 03046, Germany,  
e-mail: beirow@b-tu.de



Оригинальная статья / Original article

УДК 67.02

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-481-491>

## Выбор конструкции и материала ударника с использованием пакетов метода конечных элементов в инженерии

© М.С. Чепчуров, Е.М. Жуков

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

**Резюме:** Целью статьи является рассмотрение вопросов прочностного расчета изделий (на примере ударника), воспринимающих кратковременные нагрузки. Приводится методика расчета прочности основного элемента конструкции механизма реальной задачи расчета ударника – устройства, которое используется совместно со строительным перфоратором. Расчеты позволяют определить наилучшие размеры формы бойка ударника. При этом перфоратор задает кратковременно действующую силу на инструмент (ударник), которая расходуется на перемещение, нагрев элементов инструмента и частично возвращается обратно на механизм перфоратора. Энергия удара может достигать до 20 Дж, частота ударной нагрузки строительного перфоратора находится в диапазоне 17...35 Гц. Эксперимент показал, что кроме расчетов на статическую прочность необходимо также провести частотный анализ критических значений собственных частот колебаний конструкции. Полученные результаты были проанализированы на нормальные и максимально допустимые напряжения. Разработана методика определения статической нагрузки конструкции и ее динамического коэффициента под действием периодической ударной нагрузки. Выполненные расчеты статического нагружения и гармонического анализа позволяют определить прочность конструкции проектируемого изделия, подобрать материал заготовки, определить динамический коэффициент. Предложенный метод расчетов можно использовать не только для решения описанной в статье задачи, но и целого класса задач с ударной нагрузкой, в которых учитывается время приложения силы или длительность импульса силы.

**Ключевые слова:** прочность конструкции, ударник, материал, конечно-элементный анализ, автоматизация, ударная нагрузка

**Благодарности:** Статья подготовлена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Информация о статье:** Дата поступления 18 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 13 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Чепчуров М.С., Жуков Е.М. Выбор конструкции и материала ударника с использованием пакетов метода конечных элементов в инженерии. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):481–491. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-481-491

## Choosing striker design and material with the use of finite element method packages in engineering

Mikhail G. Chepchurov, Evgeniy M. Zhukov

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

**Abstract:** The purpose of the article is to consider the issues of strength calculation of products (on example of a striker) receiving short-term loads. The method for calculating the strength of the main structural element of the mechanism of the real calculation problem of a striker – a device that is used together with a construction perforator is presented. The calculations allow to determine the best dimensions of the striker head shape. In this case, the perforator sets a short-term force acting on the tool (striker), which is spent on moving and heating of the tool elements and partially returns back to the perforator mechanism. The impact energy can reach up to 20J, the frequency of the construction perforator shock load is in the range of 17-35 Hz. The experiment has showed that in addition to static strength calculations, it is also necessary to carry out a frequency analysis of the critical values of eigen frequencies of the structure. The results obtained are analyzed for normal and maximum allowable stresses. A method for determining the static load of the structure and its dynamic coefficient under the influence of periodic shock load is developed. The performed calculations of static loading and harmonic analysis allow to determine the structural strength of the designed product, select workpiece material and determine the dynamic coefficient. The proposed calculation method can be used both for solving the problem described in the article and for the whole class of problems with the shock load, which take into account the time of force application or duration of the force pulse.

**Keywords:** structural strength, striker, material, finite element analysis, automation, shock load

**Acknowledgements:** The article has been prepared in the frameworks of the development program of the flagship university on the basis of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov.

**Information about the article:** Received February 18, 2019; accepted for publication March 13, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Chepchurov M.S., Zhukov E.M. Choosing striker design and material with the use of finite element method packages in engineering. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):481–491. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-481-491

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Расчет прочности конструкции такого изделия как ударник (воспринимающий кратковременные нагрузки) представляет значительный интерес. Конструктор при проектировании подобных изделий сталкивается с задачей не только правильного выбора конструкции, но и подбора материала, введением элементов (или их исключением), создающих опасные напряжения [1]. Современные пакеты конечно-элементного анализа позволяют выполнить подобные расчеты, при этом они могут быть не только для одного варианта, но и с изменением размеров элементов в автоматическом режиме с выдачей готового решения. Используемые пакеты конечно-элементного анализа (КЭ) часто применяются для решения задач статики, так как в этом случае задача представляется детерминированной, нагрузки и ограничения назначаются в соответствии с правилами механики и теории прочности, использованию данных пакетов посвящено много работ<sup>1</sup> [2, 3]. Эти пакеты встраиваются в серьезные системы автоматизированного проектирования. Чаще всего указанные приложения имеют достаточно высокую стоимость и доступны лишь корпоративным пользователям.

Решение задач, связанных с динамикой объектов (в частности, с расчетом динамической прочности элементов конструкций), значительно сложнее, и при конечных расчетах предпочтительно использовать специализированные приложения, входя-

щие в различные пакеты КЭ анализа, например, LS-DYNA [4]. Пользователь, периодически встречающийся с выполнением динамического анализа конструкций, не в состоянии получить доступ к подобным пакетам, поэтому вынужден заказывать расчеты у сторонних организаций, что также влечет дополнительные временные и финансовые затраты. Очевидно, при наличии методики рентабельно было бы использовать бесплатные приложения КЭ анализа, позволяющие оценить динамическую прочность конструкций, т.е. рассчитать деформации и напряжения в элементах конструкции под действием удара. В настоящей статье в качестве средства конечно-элементных расчетов описывается CalculiX, входящий в пакет FreeCAD с лицензией GPL2 [5].

## 2. РАСЧЕТ УДАРНИКА

На примере реальной задачи расчета ударника – устройства, используемого совместно со строительным перфоратором, изложим методику расчета прочности конструкции его основного элемента, само устройство подробно описано в [1].

При расчетах целью было определение наилучших размеров формы бойка (или ударного конца) ударника в соответствии с эскизом, приведенным на рис. 1 а и схемой нагружения на рис. 1 б.

Целью расчетов является определение диаметра бойка  $D$ , длины  $H$ , находящихся в определенном диапазоне от  $D_{min}$  до  $D_{max}$ , и  $H_{min}$  до  $H_{max}$  таких значений,

<sup>1</sup>Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А. ANSYS в руках инженера: практическое руководство. М.: Либроком, 2015. 272 с. / Kaplun A.B., Morozov E.M., Olferieva M.A. ANSYS handled by an engineer: a practical guide. M.: Librokom, 2015. 272 p.

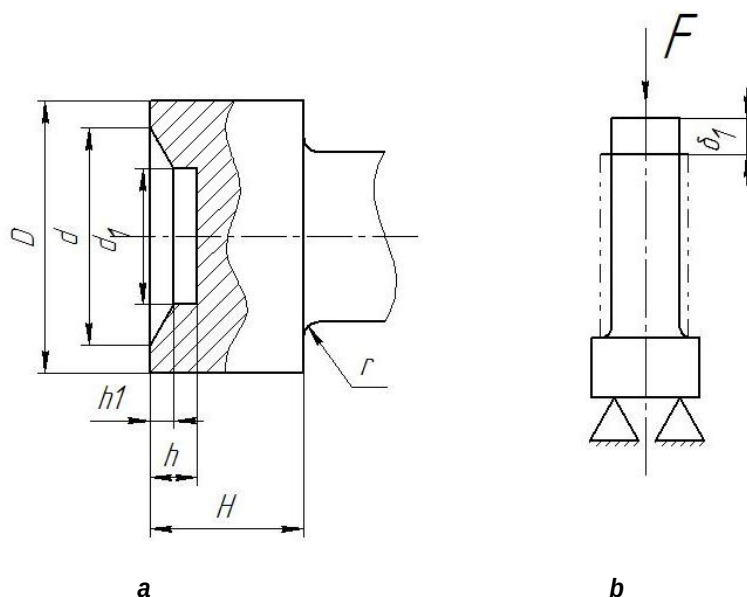


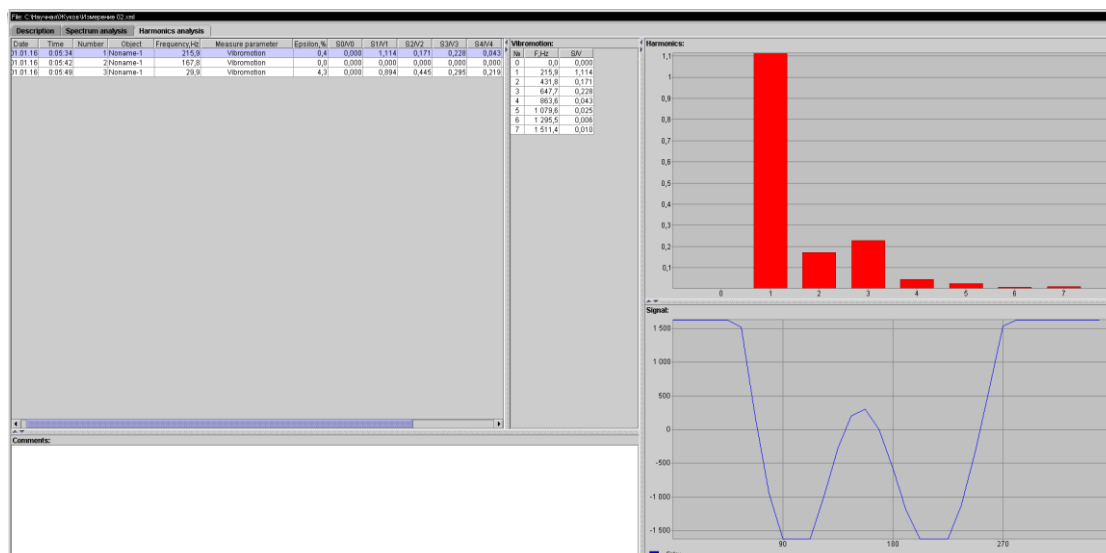
Рис. 1. Ударник и схема нагружения: а – форма бойка ударника, б – схема нагружения ударника  
Fig. 1. Striker and a loading scheme: a – striker head shape, b – loading scheme of the striker

чтобы при кратковременном действии силы  $F$  максимальные напряжения не превышали предельно допустимые для выбранного материала. Общая схема нагружения выглядит (согласно рис. 1 б) следующим образом: сила  $F$  приложена к верхнему торцу ударника, являющегося стержнем, который испытывает деформацию  $\delta_1$ , величина которой зависит от приложенной силы  $F$ , сечения стержня и модуля упругости материала.

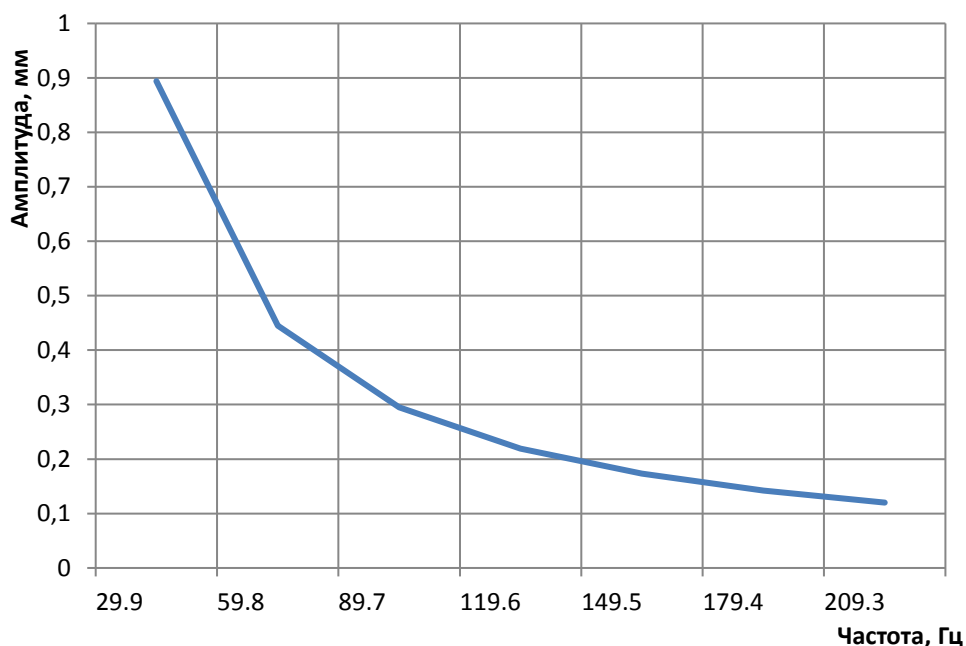
Источником действия силы  $F$  является узел перфоратора, осуществляющий периодические перемещения ударника, т. е. задающий определенную частоту коротковременно прикладываемой силы. При этом энергия удара, передаваемая инструменту, которым является ударник, расходуется на нагрев элементов конструкции и частично возвращается исполнительному элементу ударного механизма перфоратора. Производители инструмента заявляют различные значения энергии удара в зависимости от мощности устройства, при этом электропневматические перфораторы обеспечивают максимальную энергию удара до 20 Дж [6]. Частота ударов у тяжелого перфоратора достигает 1000...2000 уд/мин, что соответствует частоте колебаний рабочего органа 17...35 Гц.

Так как информация о частоте ударов и форме перемещения рабочего органа перфоратора в открытых источниках достаточно противоречива, были выполнены эксперименты по измерению частотных характеристик перфоратора с использованием прибора «Вибран 2.0», результаты измерений которого были обработаны с использованием поставляемого с прибором специального программного обеспечения (ПО). Окно этого компьютерного приложения (с результатами гармонического анализа) представлено на рис. 2.

Анализ амплитудно-частотной характеристики (рис. 3) показывает максимальные перемещения  $\approx 0,9$  мм при частоте 29,9 Гц, но при этом сигнал показывает, что присутствуют дополнительные гармоники на частотах от 51,8 Гц до 209,3 Гц. Амплитуда перемещений рабочего органа на максимальной частоте 209,3 Гц составляет примерно 13% от амплитуды несущей частоты. Следовательно, кроме расчетов на статическую прочность при решении задачи следует провести и частотный анализ с установлением критических значений частот собственных колебаний конструкции, т. е. узнать, достигают ли реальные установленные колебания одной из собственных резонансных частот.



**Рис. 2. Результаты гармонического анализа на основе данных прибора «Вибран 2.0»**  
**Fig. 2. Harmonic analysis results based on “Vibran” 2.0 data**



**Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика перемещений ударника**  
**Fig. 3. Amplitude-frequency characteristic of striker travels**

Ударник как инструмент подвергается деформации, в определенный момент времени эти деформации могут превысить предельно допустимую величину для выбранного материала. Следовательно, материал подбирается по допустимому пределу текучести, характеристики некоторых исследуемых материалов приведены в таблице, в ней же представлен и другой параметр ма-

териалов – ударная вязкость или *KCU*, значение приложенной энергии удара, при котором происходит разрушение материала. Как видно из таблицы, эти значения (как и предел текучести) зависят не только от химического состава, но и от выбранной термообработки. Материал с высоким пределом текучести может иметь меньшее значение ударной вязкости [6, 7].



**Свойства сталей**  
**Properties of steels**

| Марка стали | Термообработка: отжиг, нормализация |                       |                      | Термообработка: закалка с охлаждением в масле |                       |                      |
|-------------|-------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
|             | Модуль Юнга, МПа                    | Предел прочности, МПа | Ударная вязкость, Дж | Модуль Юнга, МПа                              | Предел прочности, МПа | Ударная вязкость, Дж |
| Сталь 20    | 210                                 | 420                   | 2,2                  | н/д                                           | н/д                   | н/д                  |
| Сталь 45    | 209                                 | 610                   | 1,2                  | 203,6                                         | 1200                  | 0,9                  |
| 40Х         | 210                                 | 630                   | 1,6                  | 204                                           | 850                   | 1,2                  |
| 18ХГТ       | 208                                 | 700                   | 2,2                  | 203,6                                         | 1000                  | 2,0                  |

При ударе нагрузка носит не статический, а динамический характер, и расчеты на статическую прочность выполняются с учетом расчетного значения динамического коэффициента [8].

Различные источники рекомендуют для выполнения динамических расчетов использовать такие же методы, что и статических:  $F_d = F_{ст} \cdot k$ ,  $\delta_{с max} = \delta_{max} \cdot k \leq [\delta]$ , где  $k$  – динамический коэффициент.

Считаем, что при ударе происходит деформация упругого стержня в продольном направлении, то есть вся энергия направлена только на его сжатие, при этом его сечение должно быть подобрано таким образом, чтобы исключить изгиб в поперечном направлении. При больших значениях приложенной силы следует проверять ударник на предельные значения критической силы по одной из известных методик, например:

$$F_{кр} = \frac{\pi^2 E \cdot I_{min}}{L^2}, \quad (1)$$

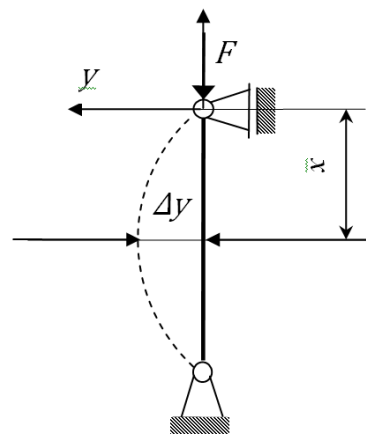
где  $E$  – модуль Юнга, МПа;  $I$  – осевой момент инерции стержня в поперечном направлении, мм<sup>2</sup>;  $L$  – длина стержня, м (или расстояние между закрепленными концами стержня).

Следует отметить, что при расчете ударника авторами использовалось значение расстояния между опорами как расстояние от торца патрона электроинструмента до рабочего торца ударника. Очевидно, в форме нахождения критической силы про-

изведения  $E \cdot I$  можно рассматривать как жесткость стержня при изгибе. При выполнении расчетов таких элементов как ударник необязательно выполнять проверку стержня на критическую устойчивость, а целесообразнее заранее подбирать соответствующие значения, но прогиб стержня под действием продольно приложенной силы следует вычислять в соответствии с рекомендациями [6, 8].

Для выбранной схемы нагрузки, например, для приведенной на рис. 4 схемы нагрузки стержня можно воспользоваться дифференциальным уравнением:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{M}{E \cdot I}, \quad (2)$$



**Рис. 4. Схема нагружения стержня**  
**Fig. 4. Bar loading diagram**

где  $M = -F \cdot y$ ; Н·м – изгибающий момент под действием силы  $F$ ;  $x$  – координата точки максимального прогиба, м.

В этом уравнении слишком много неизвестных, по этой причине в дальнейшем следует воспользоваться результатами метода конечных элементов (МКЭ).

Составим расчетную схему определения динамического коэффициента системы с ударником (рис. 5). Сила, создаваемая рабочими органами электроинструмента, прикладывается к торцу стержня, имеющего начальную длину  $l$ , мм. При этом он испытывает деформацию как упругая система с, величина этих деформаций. Полагаем, что систематическая энергия расходуется следующим образом:

$$T_0 = U_L + U_r + U_t, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где  $U_L$  – энергия деформации стержня, закрепленного (согласно схеме рис. 5) жестко;  $L$  – длина стержня, м;  $U_r = \frac{mv^2}{2}$ ; Дж – энергия, необходимая на возврат рабочего элемента электроинструмента – тарана массой  $m$ , кг;  $U_t$  – энергия, расходуемая на нагрев соударяющихся частей, которой при упругой системе можно пренебречь.

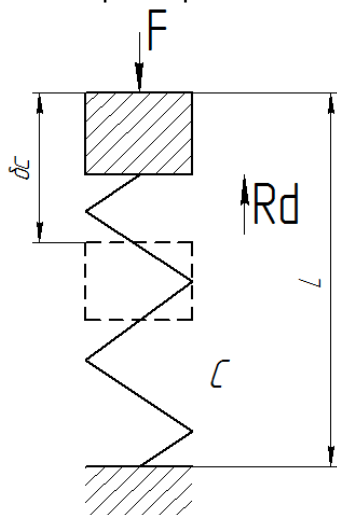


Рис. 5. Схема расчета деформации стержня  
 Fig. 5. Bar deformation calculation diagram

Масса тарана или подвижного цилиндра ударной системы электроинструмента может составлять от 0,05 кг до 0,8 кг в зависимости от мощности перфоратора. Допустим, для перфоратора, которым выполняли эксперименты, масса тарана составляла 0,07 кг, частота исследуемых колеба-

ний  $\approx 30$  Гц, максимальная величина перемещений – 30 мм, т.е. за один период совершалось  $\frac{1}{30}$  перемещений, или с учетом периодичности движения –  $\frac{1}{60}$  с, время перемещения тарана, или скорость его перемещения  $v = 0,03 \cdot 60 \text{ с} = 1,8 \text{ с}$ , откуда определяется энергия, расходуемая на возврат тарана:

$$A_T = \frac{0,07 \cdot 1,3}{2} = 0,2268, \text{ Дж}.$$

При заявленной производительности энергии удара в 2 Дж  $A_T$  составляет примерно 10% от этой энергии, таким образом,

$$T_0 - A_T = U_L \text{ или } 0,9T_0 = U_L. \quad (4)$$

Вычислим потенциальную энергию деформации:

$$U_c = \frac{1}{2} F \delta_c, \text{ Дж}, \quad (5)$$

где  $\delta_c$  – величина статической деформации, мм.

Реакция системы  $C$  на действие силы  $F$ :

$$\delta_d = R_d \cdot c, \text{ мм},$$

где  $c$  – коэффициент пропорциональности, согласно закону Гука. Таким образом, можно представить  $U_c = \frac{c}{2} \delta_c$ , Дж, а  $U_d = \frac{1}{2} R_d \cdot \delta_d = \frac{F}{2\delta_c} \cdot \delta_d^2$ , Дж. Подставив в исходное выражение 3 полученные выражения, имеем следующее:

$$0,9T_0 = \frac{F}{2\delta_c} \cdot \delta_d, \text{ Дж},$$

с учетом того, что, согласно закону Гука,

$$c = F / \delta_c \text{ Н/м}. \quad (6)$$

Таким образом,

$$0,8T_0 - \frac{F}{2\delta_c} \cdot \delta_d^2 = 0, \quad (7)$$

что дает несколько неизвестных:  $F$ ,  $\delta_c$ ,  $\delta_d$ , которые необходимо определить на основании расчетов и результатов экспериментов.



Пробуем использовать подобные расчеты для случая с падением некоего груза (в нашем случае тарана электроинструмента).

Груз массой  $m$  падает с высоты  $H$ , при этом совершается работа  $A = mgH$ , Дж, отсюда можно получить следующее:  $0,9T = mgH$ , где  $H = 0,9T_0/mg$ .

В расчетах динамического коэффициента, приведенных в [9] фигурирует именно величина  $H$ , что позволяет вычислить динамический коэффициент:

$$K_d = 1 + \sqrt{\frac{2H}{\delta_c}} \quad (8)$$

или с подстановкой

$$K_d = 1 + \sqrt{\frac{0,9T_0}{mg \delta_c}} = \sqrt{\frac{0,9T_0 \cdot \delta_c}{mg}}. \quad (9)$$

Приравняем выражения вычисления энергии удара от скорости и от высоты падения груза:

$$\frac{mv^2}{2} = mgH$$

или

$$H = \frac{gv^2}{2}, \text{ м} \quad (10)$$

или окончательно динамический коэффициент [8]

$$K_d = \sqrt{\frac{g \cdot v^2}{\delta_c}}. \quad (11)$$

Остается вычислить силу, приложенную к концу стержня, используемую в конечно-элементных расчетах и моделировании.

Согласно данным, полученным с использованием прибора «Вибран 2.0» максимальная амплитуда перемещения рабочего органа составит  $0,9 \cdot 10^{-3}$  м, тогда из курса физики для определения работы сила  $F = \frac{T}{A_{max}} \cdot H$ , где  $A_{max}$  – максимальная ампли-

туда перемещения или пути, а  $T_0 = 0,97T$ , Дж, что описано выше. Определим следующее:  $F = \frac{0,97 \cdot 3}{0,9 \cdot 10^{-3}} \cong 3100 \text{ Н}$ .

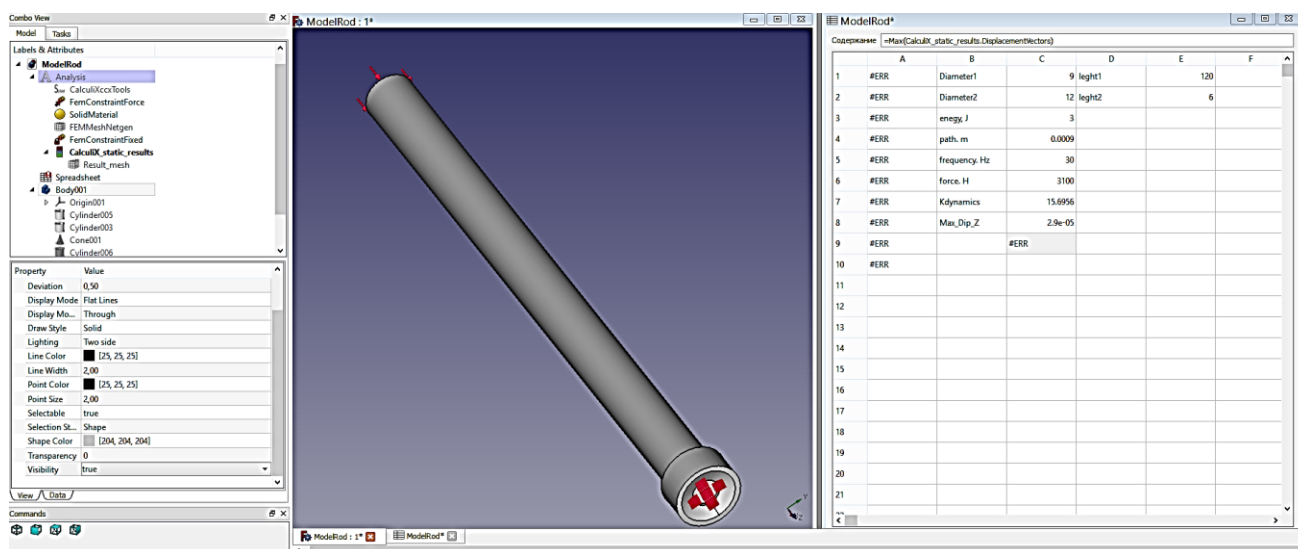
### 3. СОЗДАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

После получения всех данных можно приступить к созданию геометрической модели (согласно рис. 1), при этом изменяемые параметры заносим в таблицу, созданную в этом же проекте. После создания FEM анализа назначаем необходимые ограничения и нагрузки. Если ограничения – величина постоянная, то сила приложения к концу стержня может изменяться в зависимости от амплитуды перемещений и энергии импульса конкретного электроинструмента, как в нашем случае, и в общем – энергии импульса [9].

Электронная таблица и окно проекта представлены на рис. 6. Все действия по составлению модели и FEM анализа в среде FreeCAD с применением вычислителя CalculiX описывались в различных работах [10, 11].

Полученные результаты расчета следует проанализировать на нормальные и максимально допустимые напряжения, а также определить величину этих напряжений, окно с результатами решения представлено на рис. 7. Область модели, в которой возникает наибольшее напряжение, представлена там же. Величину максимальных напряжений можно взять из окна проекта более темными цветами, для указанных условий задания они составляют 143,73 МПа.

Согласно данным, полученным с помощью устройства «Вибран 2.0», колебательный процесс не имеет строго синусоидальную форму, следовательно, присутствуют дополнительные гармоники, частота которых может совпасть с собственной частотой колебаний ударника [12]. С этой целью выполним гармонический анализ конструкции средствами CalculiX. Результат анализа показал, что в диапазоне от 0 до 1000 Гц присутствует всего две резонансных частоты – 379,61 и 379,728 Гц, что пре-



**Рис. 6. Окно электронной таблицы и проекта**  
**Fig. 6. Spreadsheet and project window**

вышает предельные величины гармоник. Значит, опасных разрушений в конструкции не наблюдается. При этом максимальное напряжение по Мизенсу составляет всего 82,37 МПа, что меньше, чем при статической нагрузке [13]. Значения резонансных частот также заносятся в таблицу для последующего анализа. Модель с расчетами [14] позволяет провести собственные вычислительные эксперименты или использовать ее как шаблон для других моделей.

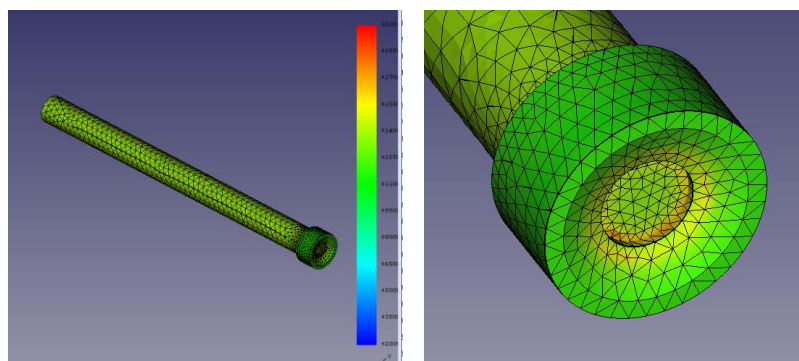
#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные результаты конечно-элементного анализа позволяют подобрать материал, обладающий допустимым пределом прочности, значительно превышающим расчетный. Материал можно подобрать из

таблицы настоящей работы. На рис. 8 приведены результаты гармонического анализа, позволяющие оценить прочность конструкции [15, 16].

Динамический коэффициент можно рассчитать, используя результаты расчета по предельным смещениям и данным прибора «Вибран 2.0» по амплитуде и частоте сигнала [17, 18]. Эти данные также можно поместить в таблицу. Заметим, что рассчитанный динамический коэффициент, согласно выражению 9, составляет 15,69.

Пакет FreeCAD позволяет создавать внутренние скрипты для автоматического выполнения вычисления. Это очень полезная функция для автоматического поиска оптимальных значений параметров конструкции [12, 19].



**Рис. 7. Результаты конечно-элементных расчетов**  
**Fig. 7. Results of finite element calculations**

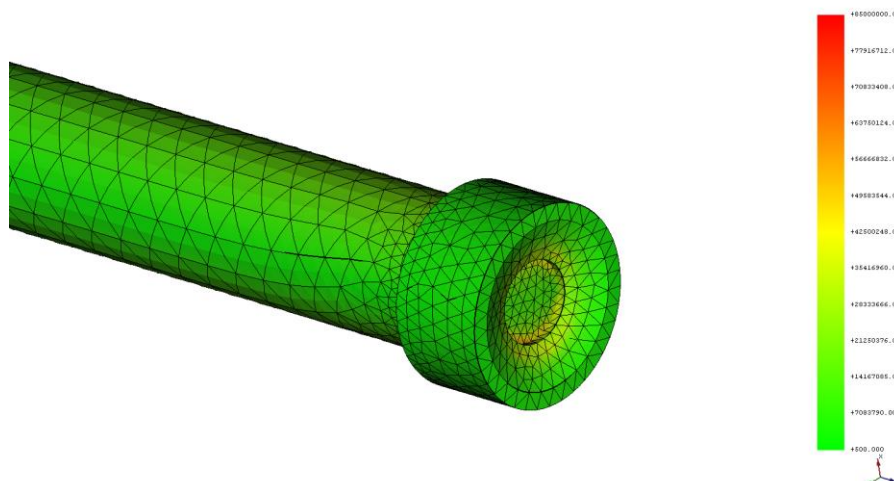


Рис. 8. Результаты гармонического анализа (частота 379,51 Гц)  
Fig. 8. Harmonic analysis results (frequency of 379.51 Hz)

При реализации автоматических вычислений следует из скрипта организовать прямой доступ к параметрам проекта: изменять диаметры, длину, нагрузки, выбирать поверхности, которыми накладываются ограничения. Также запуск вычислителя должен выполняться в автоматическом режиме после передачи в него параметров.

В качестве сеточного генератора авторами использован *Netgen 3.0*, его отдельный вызов не требуется, т.к. изменение сетки происходит автоматически.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика определения статической нагрузки конструкции и ее динамического коэффициента под действием периодической ударной нагрузки, позволяющей определить величину статической деформации максимального напряжения с ис-

пользованием системы конечно-элементного анализа.

Выполненные расчеты статического нагружения и гармонического анализа позволяют определить прочность конструкции проектируемого изделия [20], подобрать материал заготовки, определить динамический коэффициент, при этом авторами предусмотрено (для сокращения времени расчетов) использование встроенного пакета конечно-элементного анализа, а также электронных таблиц.

Предложенный метод расчетов динамического коэффициента и величины прикладываемой силы базируется на основе эмпирических расчетов конструкции при приложении определенной работы, что позволяет использовать его не только для решения описанной в статье задачи, но и целого класса задач с ударной нагрузкой, в которых учитывается время приложения силы или длительность импульса силы.

## Библиографический список

1. Чепчуров М.С. Обработка деталей с неравномерным по структуре материалом припуска // Технология машиностроения. 2008. № 10. С. 12–14.
2. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера. Механика разрушения. М.: Ленанд, 2010. 456 с.
3. Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов / пер. с англ. Г.В. Демидова, А.Л. Урванцева. М.: Мир, 1981. 304 с.
4. LS-DYNA. Theory Manual [Электронный ресурс].

URL: <https://www.pdfdrive.com/ls-dyna-theory-manual-e34791471.html> (дата обращения: 10.03.2019).

5. FreeCAD [Электронный ресурс]. URL: <https://www.freecadweb.org> (дата обращения: 20.08.2018).

6. Атапин В.Г., Родионов А.И., Рыков А.А., Титоренко В.П., Юрьев Г.С., Иванов Ю.А. Стенды и устройства для испытаний материалов и специзделий на ударную прочность и ударную устойчивость // Научный вестник Новосибирского государственного техниче-

ского университета. 2009. № 3 (36). С. 87–98.

7. Kruszka L., Vorobiov Y.S., Ovcharova N.Y. FEM Analysis of Cylindrical Structural Elements under Local Shock Loading, Applied Mechanics and Materials [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.566.499> (дата обращения: 20.08.2018).

8. Куликов С.В., Терновская О.Н. Статистическое моделирование процесса образования ударной волны в ударной трубе на многопроцессорном компьютере // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2004. Т. 5. № 1. С. 124–128.

9. Barbieri N., Novak P.R., Barbieri R. Experimental identification of damping, International Journal of Solids and Structures. 2004. Vol. 41. Issue 13. P. 3585–3594. [Электронный ресурс]. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.02.006>. (дата обращения: 25.08.2018).

10. CalculiX USER'S MANUAL - CalculiX GraphiX, Version 2.14. Klaus Wittig. May 29, 2018. URL: [http://www.dhondt.de/cgx\\_2.14.pdf](http://www.dhondt.de/cgx_2.14.pdf). (дата обращения: 25.08.2018).

11. Falck D., Collette B. Solid Modeling with the power of Python, FreeCAD [How-To], Packt Publishing Ltd. 2012, 69 p.

12. Adhikari S., Murmu T., McCarthy M.A. Dynamic finite element analysis of axially vibrating nonlocal rods. Finite Elements in Analysis and Design. 2013. Vol. 63. P. 42–50. DOI: 10.1016/j.finel.2012.08.001.

13. Khulief Y.A., Shabana A. Dynamic analysis of constrained system of rigid and flexible bodies with intermittent motion. Journal of Mechanical Design. Transactions of the ASME. 1986. Vol. 108. No. 1. P. 38–45. URL: <https://doi.org/10.1115/1.3260781> (дата обращения: 10.03.2019).

14. Облачное хранилище файлов URL: <https://cloud.mail.ru/public/E3ab/m6Qh2zjrQ> (дата обращения: 10.03.2019).

15. Васильевич Ю.В., Довнар С.С. Анализ резонансного поведения несущей системы крупногабаритного станка типа «подвижная стойка» // Наука и техника. 2015. № 5. С. 10–17.

16. Васильевич Ю.В., Довнар С.С., Шумский И.И. Модальный анализ несущей системы тяжелого горизонтального многоцелевого станка с помощью метода конечных элементов // Наука и техника. 2014. № 4. С. 14–24.

17. Mattila T.T., Marjamaki P., Nguyen L., Kivilahti J.K. Reliability of Chip Scale Packages under Mechanical Shock Loading, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. The proceedings of the 56th electronic component and technology conference (San Diego, USA, 30 May–2 June 2006). San Diego, 2006, pp. 584–589.

18. Mattila T.T., Laurila T., Vuorinen V., Kivilahti J.K. Reliability of Electronic Assemblies Under Mechanical Shock Loading. The ELFNET Book on Failure Mechanisms. Testing Methods, and Quality Issues of Lead-Free Solder Interconnects. Springer, London. 2011. P. 197–225. URL: [https://doi.org/10.1007/978-0-85729-236-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-236-0_9) (дата обращения: 25.08.2018).

19. Angelo L., Leali F., Stefano P. Can Open-Source 3D Mechanical CAD Systems Effectively Support University Courses? // International Journal of Engineering Education. 2016. Vol. 32. No. 3(A). P. 1313–1324.

20. Пат. № 142819, Российская Федерация, МПК F16B 13/00 (2006.01). Устройство для забивания дюбелей / Е.М. Жуков, М.С. Чепчуров; заявители и патентообладатели Е.М. Жуков, М.С. Чепчуров. № 2014110755/12; заявл. 20.03.2014; опубл. 10.07.2014. Бюл. № 19.

## References

1. Chepchurov M.S. Processing of parts with allowance material uneven in structure. Tekhnologiya mashinostroeniya [Mechanical Engineering Technology]. 2008, no. 10, pp. 12–14. (In Russ.).

2. Morozov E. M., Muzemnek A.Yu., Shadskij A.S. ANSYS v rukah inzhenera. Mekhanika razrusheniya [ANSYS in the hands of an engineer. Fracture mechanics]. Moscow: Lenend Publ., 2010, 456 p. (In Russ.).

3. Norri D., Friz Zh. Introduction to the finite element method, 1981. 304 p. (Russ. ed.: Vvedenie v metod konechnykh elementov. Moscow, Mir Publ., 1981. 304 p.). (In Russ.).

4. LS-DYNA. Theory Manual. Available at: <https://www.pdfdrive.com/ls-dyna-theory-manual-e34791471.html> (accessed 10 March 2019).

5. FreeCAD. Available at: <https://www.freecadweb.org> (accessed 20 August 2018).

6. Atapin V.G., Rodionov A.I., Rykov A.A., Titorenko V.P., Yur'ev G.S., Ivanov Yu.A. Test benches and devices for testing materials and special details on impact strength and impact stability. Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta

[Science Bulletin of the Novosibirsk State Technical University], 2009, no. 3 (36), pp. 87–98. (In Russ.).

7. Kruszka L., Vorobiov Y.S., Ovcharova N.Y. FEM Analysis of Cylindrical Structural Elements under Local Shock Loading, Applied Mechanics and Materials. Available at: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.566.499>. (accessed 20 August 2018).

8. Kulikov S.V., Ternovaya O.N. Monte Carlo statistical simulation with a multiprocessor computer for the process of forming a shock wave in a shock tube. Vychislitel'nye metody i programmirovaniye: novye vychislitel'nye tekhnologii [Numerical methods and programming: new computing technologies], 2004, vol. 5, no. 1, pp. 124–128. (In Russ.).

9. Barbieri N., Novak P.R., Barbieri R. Experimental identification of damping, International Journal of Solids and Structures. 2004, vol. 41, Issue 13, pp. 3585–3594. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.02.006>. (accessed 25 August 2018).

10. CalculiX USER'S MANUAL - CalculiX GraphiX, Ver-



sion 2.14. Klaus Wittig. May 29, 2018. Available at: [http://www.dhondt.de/cgx\\_2.14.pdf](http://www.dhondt.de/cgx_2.14.pdf). (accessed 25 August 2018).

11. Falck D., Collette B. Solid Modeling with the power of Python, Freecad [How-To], Packt Publishing Ltd, 2012, 69 p.

12. Adhikari S., Murmu T., McCarthy M.A. Dynamic finite element analysis of axially vibrating nonlocal rods. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, 63, pp. 42–50. DOI: 10.1016/j.finel.2012.08.001.

13. Khulief Y.A., Shabana A. Dynamic analysis of constrained system of rigid and flexible bodies with intermittent motion. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 1986, vol. 108, no. 1, pp. 38–45. <https://doi.org/10.1115/1.3260781> (accessed 10 March 2019).

14. Oblachnoe hranilishche fajlov [Cloud file storage]. Available at: <https://cloud.mail.ru/public/E3ab/m6Qh2zjrQ> (accessed 10 March 2019).

15. Vasil'evich Yu.V., Dovnar S.S. Resonance behavior analysis of carrying system in heavy machine with traveling column. *Nauka i tekhnika* [Science and Technology], 2015, no. 5, pp. 10–17. (In Russ.).

Vasilevich Yu.V., Dovnar S.S., Shumskij I.I. Modal analysis of carrier system for heavy horizontal multifunction

machining center by finite element method. *Nauka i tekhnika* [Science and Technology], 2014, no. 4, pp. 14–24. (In Russ.).

16. Mattila T.T., Marjamaki P., Nguyen L., Kivilahti J.K. Reliability of Chip Scale Packages under Mechanical Shock Loading, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*. The proceedings of the 56th electronic component and technology conference (San Diego, USA, 30 May–2 June 2006). San Diego, 2006. P. 584–589.

17. Mattila T.T., Laurila T., Vuorinen V., Kivilahti J.K. Reliability of Electronic Assemblies Under Mechanical Shock Loading. The ELFNET Book on Failure Mechanisms. Testing Methods, and Quality Issues of Lead-Free Solder Interconnects. Springer, London. 2011, pp. 197–225. Available at: [https://doi.org/10.1007/978-0-85729-236-0\\_9](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-236-0_9) (accessed 25 August 2018).

18. Angelo L., Leali F., Stefano P. Can Open-Source 3D Mechanical CAD Systems Effectively Support University Courses? *International Journal of Engineering Education*, 2016, vol. 32, no. 3(A), pp. 1313–1324.

19. Zhukov E.M., Chepchurov M.S. *Ustrojstvo dlya zabivaniya dyubelej* [Dowel plugging device]. Patent RF, no. 142819, 2014.

#### Критерии авторства

Чепчуров М.С., Жуков Е.М. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Chepchurov M.S., Zhukov E.M. have equal authors rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

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

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Чепчуров Михаил Сергеевич,

доктор технических наук,  
профессор кафедры технологии машиностроения  
Института технологического оборудования  
и машиностроения,  
Белгородский государственный  
технологический университет им. В.Г. Шухова,  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия,  
e-mail: avtpost@mail.ru

##### Жуков Евгений Михайлович,

кандидат технических наук,  
доцент кафедры технологии машиностроения  
Института технологического оборудования  
и машиностроения,  
Белгородский государственный технологический  
университет им. В.Г. Шухова,  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, Россия,  
e-mail: jonyj@yandex.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Mikhail G. Chepchurov,

Dr. Sci. (Eng.),  
Professor of the Department of Mechanical  
Engineering Technology  
of the Institute of Technological Equipment  
and Mechanical Engineering,  
Belgorod State Technological University named  
after V. G. Shukhov,  
46 Kostyukov St., Belgorod 308012, Russia,  
e-mail: avtpost@mail.ru

##### Evgeniy M. Zhukov,

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Mechanical Engineering Technology  
of the Institute of Technological Equipment  
and Mechanical Engineering,  
Belgorod State Technological University named  
after V. G. Shukhov,  
46 Kostyukov St., Belgorod 308012, Russia,  
e-mail: jonyj@yandex.ru



## Методические подходы к оценке эффективности перевода дизельных электростанций на альтернативные виды топлива

© Е.Р. Абдулина

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

**Резюме:** Цель статьи – рассмотрение методов оценки эффективности перевода дизельных электростанций на альтернативные виды топлива. Для обеспечения изолированных удаленных районов Крайнего Севера электроэнергией применяются дизельные электростанции, на которых используется дорогостоящее привозное дизельное топливо. Стоимость производимой на нем электроэнергии колеблется от 10 до 40 руб./кВт·ч. Освоение месторождений полезных ископаемых в этих районах (таких как природный газ и нефть), позволяет переводить местные дизельные электростанции на другие виды топлива. Данный переход требует значительных инвестиций в модернизацию существующих дизельных электростанций. Для этого необходимо технико-экономическое обоснование перевода на другие виды топлива. В исследованиях использованы официальные данные, методы сравнительного анализа и результаты расчетов автора. Расчеты произведены на производственно-финансовой модели. Дана краткая характеристика мировой практики оценки экономической эффективности инвестиционных проектов. Представлен метод оценки эффективности перевода действующих дизельных электростанций на альтернативные виды топлива (природный газ). Представителями энергосберегающей политики предлагается постепенный переход действующих дизельных электростанций на альтернативные виды топлива, экономически и технически более выгодные в тех или иных условиях удаленных территорий Крайнего Севера. На примере перевода существующей дизельной электростанции на природный газ появилась возможность оценить высокую эффективность данного проекта.

**Ключевые слова:** дизельная электростанция, дизельное топливо, природный газ, альтернативные виды топлива, показатели эффективности проекта

**Информация о статье:** Дата поступления 13 мая 2019 г.; дата принятия к печати 31 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Абдулина Е.Р. Методические подходы к оценке эффективности перевода дизельных электростанций на альтернативные виды топлива. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):492–502. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-492-502

## Methodological approaches to efficiency estimation of diesel electric power station switch to alternative fuel types

Elena R. Abdulina

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the article is to consider the estimation methods of the efficiency of diesel power stations switch to alternative kinds of fuel. To provide isolated remote areas of the Far North of Russia with electric energy, diesel power stations are used, which require expensive imported diesel fuel. The cost of the produced electric energy ranges from 10 to 20 rubl/kWh. Development of mineral resources such as natural gas, oil in these areas allows to transfer local diesel power stations to other kinds of fuel. This switch requires a significant investment in the modernization of existing diesel power stations substantiated by a feasibility study of the switch to other fuels. The study uses official data, methods of comparative analysis and author's calculation results. The calculations are made on the basis of the production and financial model. The world practice of investment project economic efficiency assessment is briefly characterized. A method to estimate the efficiency of existing diesel power stations switch to alternative types of fuel (natural gas) is presented. The representatives of the energy-saving policy propose a gradual transition of existing diesel power plants to alternative types of fuel that are economically and technically more advantageous in certain conditions of remote areas of the Far North. On example of existing diesel power plant switch to natural gas an opportunity has been received to evaluate the high efficiency of the project.

**Keywords:** diesel power station, diesel fuel, natural gas, alternative types of fuel, project performance indicators

**Information about the article:** Received May 13, 2019; accepted for publication May 31, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Abdulina E.R. Methodological approaches to efficiency estimation of diesel electric power station switch to

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В удаленных районах Крайнего Севера себестоимость производимой на дизельных электростанциях электроэнергии на привозном топливе очень высока. Дизельное топливо доставляется издалека в эти труднодоступные районы и является дорогостоящим, цена производимой на нем электроэнергии колеблется от 10 до 40 руб./кВт·ч [1–7].

В связи с освоением мест добычи углеводородов в районах Крайнего Севера появляется возможность переводить местные дизельные электростанции на добываемые рядом виды топлива [8, 9], что позволит снизить затраты на него, тем самым сократив расходы на производство электроэнергии [10–13].

Для компаний, использующих дизельные электростанции для выработки электроэнергии, возникает необходимость в поиске оптимальных вариантов энергоснабжения с использованием альтернативных видов топлива. Оптимальный вариант перевода дизельной электростанции на другие виды горючего выбирают исходя из оценки эффективности проекта по переводу на тот или иной вид топлива. Для анализа эффективности перевода дизельных электростанций на другие виды горючего предлагается разработанная автором производственно-финансовая модель, основанная на принятых в Российской Федерации «Методических рекомендациях по оценке эффективности инвестиционных проектов»<sup>1</sup>.

## 2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИНВЕСТИЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ В ЭНЕРГЕТИКЕ

В мировой практике накоплен большой опыт оценки экономической эффектив-

ности инвестиционных проектов, который базируется на присущих конкретной отрасли различных методиках.

Международная практика обоснования проектов использует такие обобщающие показатели эффективности проекта как чистый дисконтированный поток денежных средств (NPV), внутренняя норма доходности (IRR), простой срок окупаемости (PBP), дисконтированный срок окупаемости (DPBP), индекс прибыльности (PI) и др. [14, 15].

При расчете этих показателей используют таблицу денежных потоков, которая содержит сводные данные об инвестициях, текущих затратах по каждому году реализации такого проекта. С ее помощью рассчитывают чистый дисконтированный поток денежных средств, срок окупаемости проекта и другие критерии, выбранные для оценки эффективности.

Показатель чистого дисконтированного денежного потока представляет собой разность между денежными потоками базового варианта и альтернативного, учитывающими суммарный доход от реализации проекта, рассчитанного за период реализации проекта и всех видов расходов, суммированных за тот же период, с учетом фактора времени (1). Максимум чистого дисконтированного потока денежных средств выступает как один из важнейших критериев обоснования проекта, он обеспечивает максимизацию доходов инвесторов в долгосрочном планировании.

$$NPV = \sum_{t=1}^T (Z_t^B - Z_t^A) \cdot D_t, \quad (1)$$

где:  $Z_t^B$  – денежный поток базового варианта в период  $t$  ( $t=1, \dots, T$ );  $Z_t^A$  – денежный поток альтернативного варианта в период  $t$  ( $t=1, \dots, T$ );  $D_t$  – коэффициент дисконтирования ( $t=1, \dots, T$ ).

<sup>1</sup>Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов: утв. Минэкономки РФ, Минфином РФ, Госстроем РФ от 21.06.1999. № ВК 477 / Methodical recommendations for investment project effectiveness estimation. Approved by the Ministry of Economics of the Russian Federation, the Ministry of Finance of the Russian Federation, State Committee for Construction of the Russian Federation of 21 June 1999, no. VK 477.



Проект считается эффективным (при принятой норме дисконта), если  $NPV$  инвестиционного проекта больше нуля.

Графическое отображение динамики показателя дисконтированного чистого денежного потока, рассчитанного нарастающим итогом, представляет собой финансовый профиль проекта (рис. 1).

Внутренняя норма доходности рассчитывается аналитически как пороговое значение рентабельности, при которой чистый дисконтированный поток денежных средств равен нулю (2):

$$IRR = D_1 + \frac{PNPV \cdot (D_1 - D_2)}{|PNPV| + |NNPV|}, \quad (2)$$

где  $PNPV$  – положительное значение чистого дисконтированного потока денежных средств при коэффициенте дисконтирования, равном  $D_1$ ;

$NNPV$  – отрицательное значение чистого дисконтированного дохода при коэффициенте дисконтирования  $D_2$ , а разность между  $D_1$  и  $D_2$  не более 1%.

Проект считается рентабельным, если внутренняя норма доходности не ниже исходного порогового значения.

Индекс прибыльности определяется как отношение чистого денежного потока к сумме всех инвестиций, рассчитывается аналитически для каждого года реализации

проекта, но может и как среднегодовая величина (3):

$$PI = PV / K^A, \quad (3)$$

где  $PV$  – чистый денежный поток;  $K^A$  – объем первоначальных инвестиций альтернативного варианта.

Чем выше  $PI$ , тем больше отдача от первоначальных инвестиций.

Срок окупаемости представляет собой период времени, в течение которого доходы возмещают основные первоначальные инвестиции и другие затраты, связанные с инвестиционным проектом. Показатель определяется по таблице денежных потоков или с помощью графика (рис. 1).

Инвестиционный проект считается эффективным, если срок окупаемости меньше или равен периоду времени, определяемому на основе прошлых опытов осуществления аналогичных проектов.

Максимальный денежный отток – наименьшее отрицательное значение чистого дисконтированного дохода, рассчитанного нарастающим итогом. Этот показатель отражает необходимые размеры финансирования проекта и включает в себя все другие затраты. Показатель определяется по таблице денежных потоков или определяется с помощью графика, представленного на рис. 1.



Рис. 1. Финансовый профиль инвестиционного проекта  
Fig. 1. Financial profile of the investment project

Эффективность инвестиционного проекта оценивается с учетом всех показателей, перечисленных или определенных инвестором, поскольку ни один из них не является единственным и достаточным для оценки.

Повышению надежности таких оценок служит анализ чувствительности, который представляет собой расчет зависимости обобщающих финансово-экономических показателей от тех или иных изменений исходных данных проекта, он позволяет обосновать выбранные варианты.

Анализ чувствительности показателей связан с исследованием риска [16], именно он показывает невозможность предсказать условия реализации плана, возможное снижение эффективности, вплоть до перехода в убыточный проект.

Также проводится исследование равноэкономичности базового и альтернативного вариантов с целью соотношения цен на топливо – оба варианта становятся равнозначными по затратам.

### **3. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОДА ДЕЙСТВУЮЩИХ ДИЗЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫЕ ВИДЫ ТОПЛИВА**

Для выбора более подходящего варианта перевода на альтернативные виды горючего все варианты сравнивают с существующим вариантом – использованием дизельного топлива.

Для сравнения проектов по базовому варианту и модификации перевода дизельной электростанции на другое топливо необходимо определить размеры инвестиций и текущие расходы для каждой вариации.

Текущие расходы включают в себя затраты на используемое топливо, прочие эксплуатационные издержки: общепроизводственные расходы (без амортизации), неучтенные материальные траты; финансовые ресурсы на оплату труда с отчислениями, а также за загрязнение окружающей среды, налоги и амортизационные составляющие.

Для оценки эффективности перевода действующих дизельных электростанций на альтернативные виды топлива предлагается разработанная производственно-финансовая модель, смысл которой заключается в сравнении денежных потоков по базовому и альтернативному вариантам (1).

Денежный поток базового варианта включает в себя все доходы и расходы по реализации основной модификации и рассчитывается по (4):

$$Z^B = \sum_{t=1}^T (K_t^B + W_t^B * b_t^B * L_t^B + Z_t^B * n_t^B + \Gamma_t^B + H_t^B + \mathcal{E}_t^B - A_t^B), \quad (4)$$

где  $K_t^B$  – капитальные затраты, млн руб.;  $W_t^B * b_t^B * L_t^B$  – затраты на топливо, млн руб.;  $Z_t^B * n_t^B$  – затраты на оплату труда, млн руб.;  $\Gamma_t^B$  – прочие эксплуатационные затраты, млн руб.;  $H_t^B$  – налоги, млн руб.;  $\mathcal{E}_t^B$  – плата за загрязнение окружающей среды, млн руб.;  $A_t^B$  – амортизация, млн руб.

Капитальные затраты для базового варианта будут равны нулю, т.к. при текущем состоянии дизельной электростанции они не требуются.

Затраты на дизельное топливо определяются по (5):

$$Z_T^B = W_t^B * b_t^B * L_t^B, \quad (5)$$

где  $L_t^B$  – цена дизельного топлива, тыс. руб./т;  $b_t^B$  – удельный расход дизельного топлива, тыс. т/кВт·ч;  $W_t^B$  – выработанная электроэнергия, млн кВт·ч.

Затраты на оплату труда с отчислениями базового варианта определяются по (6):

$$Z_{\Phi OT}^B = Z_t^B * n_t^B, \quad (6)$$

где  $Z_t^B$  – средняя заработная плата работников дизельной электростанции при работе на дизельном топливе, млн руб.;  $n_t^B$  – численность персонала на дизельной электростанции при работе на дизельном топливе, чел.



Прочие эксплуатационные затраты базового варианта состоят из общепроизводственных затрат и неучтенных расходов, они определяются по формуле (7):

$$\Gamma_t^B = Z_{\text{общ.пр.}}^B + Z_H^B, \quad (7)$$

где  $Z_{\text{общ.пр.}}^B$  – общепроизводственные затраты базового варианта, млн руб.;  $Z_H^B$  – прочие неучтенные затраты базового варианта, млн руб.

Денежный поток альтернативного варианта рассчитывается по аналогии с базовым и содержит те же составляющие, определяемые по аналогичным формулам.

Капитальные затраты для альтернативного варианта будут состоять из первоначальных инвестиций (в млн руб.).

Для определения амортизационных отчислений для базового и альтернативного вариантов учитывается балансовая стоимость существующего оборудования и нового смонтированного с учетом срока полезного использования.

Налог на имущество для базового и альтернативного вариантов определяется как 2,2% от среднегодовой стоимости установленного оборудования (в млн руб.).

Используя эту производственно-финансовую модель, произведем оценку эффективности перевода действующей дизельной электростанции на природный газ. Оценка будет осуществлена для конкретной дизельной электростанции, расположенной в Республике Саха (Якутия), состоящей из 6 дизель-генераторов «Wärtsilä» мощностью 3 375,0 кВт.

#### 4. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПЕРЕВОДА ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ НА ПРИРОДНЫЙ ГАЗ. ИСХОДНЫЕ ПРЕДПОСЫЛКИ

Топливо-энергетический баланс рассматриваемой промплощадки был составлен с использованием исходной информации, предоставленной компанией, которой принадлежит месторождение. В табл. 1 приведены фактические показатели выработки электрической энергии и расходы дизельного топлива (исходные предпосылки для расчетов).

Электрическая нагрузка рассчитывалась с учетом числа часов использования максимальной мощности  $T_{\text{макс}} = 6\,000$  ч.

Удельный расход дизельного топлива был получен расчетным способом, исходя из выработки и потребления электрической энергии.

Собственные нужды дизельной электростанции «Wärtsilä» на дизельном топливе составляют 6%.

Общепроизводственные расходы – 247,3 млн руб./год.

Технико-экономические показатели вариантов использования топлива рассчитываются с помощью производственно-финансовой модели, в которой рассматриваются и рассчитываются технические и экономические данные. К техническим показателям относятся: выработка электроэнергии, собственные нужды, отпущенная электроэнергия, расход топлива на выработку электроэнергии, коэффициент полезного действия (КПД).

Таблица 1

**Выработка электрической энергии и расход дизельного топлива**

Table 1

##### *Electric power generation and diesel consumption*

| Дизельная электростанция | Нагрузка, МВт | Выработка, млн кВт·ч | Потребление, млн кВт·ч | Годовой расход топлива, тыс. т | Удельный расход топлива, г/кВт·ч | Собственные нужды, млн кВт·ч |
|--------------------------|---------------|----------------------|------------------------|--------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| Wärtsilä                 | 15,1          | 52,8                 | 49,6                   | 11,0                           | 209,0                            | 3,2                          |

К экономическим показателям относятся: себестоимость производства электрической энергии, затраты на топливо, на оплату труда, за загрязнение окружающей среды, прочие эксплуатационные издержки и полные материальные расходы с учетом требуемых инвестиций. Показатели рассчитываются как по годам, так и в целом за весь рассматриваемый период, который составляет 20 лет. Коэффициент дисконтирования в расчетах – 11.

Преимущества природного газа перед дизельным топливом ведут [17–20] к снижению платы за загрязнение окружающей среды до 20% и снижению затрат на топливо (минимальные затраты на добычу, транспортировку и подготовку газа к сжиганию).

Для перевода действующей дизельной электростанции на природный газ рассматривались двухтопливные двигатели, переведенные на частичное сжигание газа, где он является основным топливом, потребление которого составляет 80%, а также дизельное топливо, используемое как

запальное для зажигания газозоудной смеси внутри камеры сгорания, потребление которого составляет 20%.

Одной из особенностей таких двигателей является повышенная потребность в смазочном масле, затраты на смазочное масло учитывались при определении прочих эксплуатационных затрат.

Модернизация сохраняет срок службы компонентов установки, график проведения технического обслуживания и капитального ремонта в соответствии с требованиями завода-изготовителя, значит, общепроизводственные и прочие неучтенные затраты при переводе дизельной электростанции на природный газ останутся как при использовании дизельного топлива.

Собственные нужды сократятся на природном газе на 2% и составят 4%.

Принципиально технология сжигания газа не отличается от технологии сгорания дизельного топлива, поэтому затраты на оплату труда с отчислениями останутся как при сжигании дизельного топлива.

**Таблица 2**

**Технико-экономические показатели**

**Table 2**

**Technical and economic indicators**

| Показатель, единица измерения                                     | Базовый вариант | Вариант перевода на природный газ |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| <b>Инвестиции</b>                                                 |                 |                                   |
| ДЭС «Wärtsilä», млн руб., в т. ч.:                                | –               | 445,5                             |
| ПИР, млн руб.                                                     | –               | 17,2                              |
| Оборудование, млн руб.                                            | –               | 291,4                             |
| доставка оборудования, млн руб.                                   | –               | 87,4                              |
| ПНР, млн руб.                                                     | –               | 49,5                              |
| <b>Стоимостные показатели</b>                                     |                 |                                   |
| Дизельное топливо, тыс. руб./т                                    | 48,5            | 48,5                              |
| Природный газ (сетевой), тыс. руб./тыс. м <sup>3</sup>            | –               | 12,1                              |
| <b>Потребление топливных ресурсов</b>                             |                 |                                   |
| Удельный расход топлива на выработку электроэнергии, г у.т./кВт·ч | 303,0           | 323,0                             |
| Выработка электроэнергии, млн кВт·ч                               | 52,8            | 51,7                              |
| Собственные нужды, млн кВт·ч                                      | 3,2             | 2,1                               |
| Отпущенная электроэнергия, млн кВт·ч                              | 49,6            | 49,6                              |
| КПД                                                               | 0,38            | 0,37                              |

Примечание. Источник – расчеты автора / Source – author calculations.



Инвестиции в модернизацию существующей дизельной электростанции на природный газ будут состоять из затрат на проектно-изыскательские работы (ПИР), стоимости оборудования и его доставки к объекту, а также затрат на пуско-наладочные работы (ПНР).

В табл. 2 указаны технико-экономические показатели перевода действующей дизельной электростанции на природный газ.

В соответствии с исходными данными, произведена оценка перевода дизельной электростанции на природный газ, результаты которой приведены в сравнительной табл. 3.

Из расчетов очевидно, что полные

затраты за рассматриваемый период при переводе на природный газ сократятся на 4,4 млрд за счет значительного снижения затрат на топливо. Себестоимость электроэнергии, произведенной на природном газе, снизится на 26,9%.

Перечень ключевых показателей эффективности проекта приведен в табл. 4.

Финансовый профиль проекта по переводу действующей дизельной электростанции на природный газ приведен на рис. 2.

Ключевые показатели проекта: положительный NPV, IRR 41,8%, срок окупаемости 3 года иллюстрируют высокую эффективность перевода действующей дизельной электростанции на природный газ.

**Таблица 3**

**Технико-экономические показатели перевода действующей дизельной электростанции на природный газ за рассматриваемый период**

**Table 3**

**Technical and economic indicators of the operating diesel power station switch to natural gas for the period under consideration**

| Показатель, единица измерения                                            | Базовый вариант | Вариант перевода на природный газ |
|--------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------|
| <b>Затраты равны, млн руб., в т.ч.:</b>                                  | 16 260,7        | 11 882,6                          |
| Затраты на топливо, млн руб.                                             | 10 697,2        | 5 330,7                           |
| Оплата труда с отчислениями, млн руб.                                    | 476,9           | 476,9                             |
| Прочие эксплуатационные затраты, млн руб.                                | 5 216,7         | 5 862,7                           |
| Плата за загрязнение окружающей среды, млн руб.                          | 1,3             | 0,3                               |
| Себестоимость электроэнергии с учетом амортизации, руб./кВт·ч            | 17,0            | 12,4                              |
| Снижение себестоимости электроэнергии в сравнении с базовым вариантом, % | –               | 26,9                              |

Примечание. Источник – расчеты автора / Source – author calculations.

**Таблица 4**

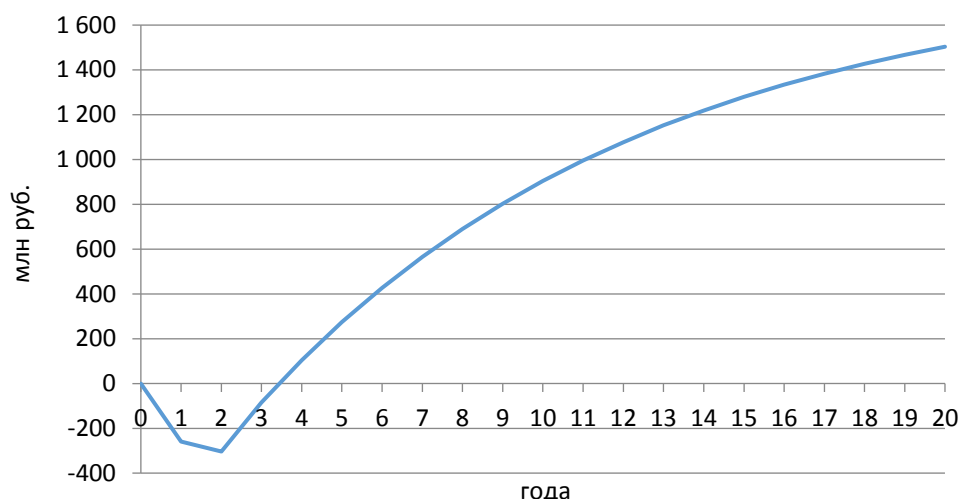
**Ключевые показатели эффективности проекта**

**Table 4**

**Key project performance indicators**

| Показатель, единица измерения                            | Величина |
|----------------------------------------------------------|----------|
| Чистый дисконтированный поток денежных средств, млн руб. | 1 503,5  |
| Внутренняя норма доходности, %                           | 41,8     |
| Индекс прибыльности                                      | 3,4      |
| Простой срок окупаемости проекта, лет                    | 3,0      |
| Дисконтированный срок окупаемости проекта, лет           | 3,4      |

Примечание. Источник – расчеты автора / Source – author calculations.



**Рис. 2. Показатель эффективности проекта потока денежных средств, млн руб.**  
**Fig. 2. Project cash flow performance indicator, mln rub**

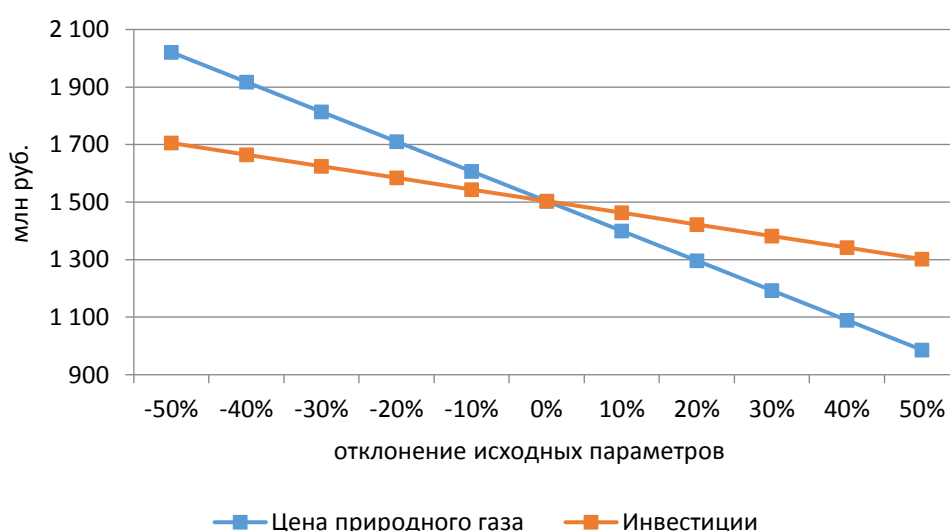
Проведенный анализ чувствительности определил уровень влияния расчетных показателей инвестиционного проекта на достигнутые результаты. С помощью анализа чувствительности проекта определили критические границы изменения расчетных показателей проекта, в частности, как повлияет изменение цены топлива или изменение инвестиций на показатель эффективности проекта.

Анализ чувствительности показателя эффективности проекта NPV приведен на рис. 3, он позволяет увидеть степень воз-

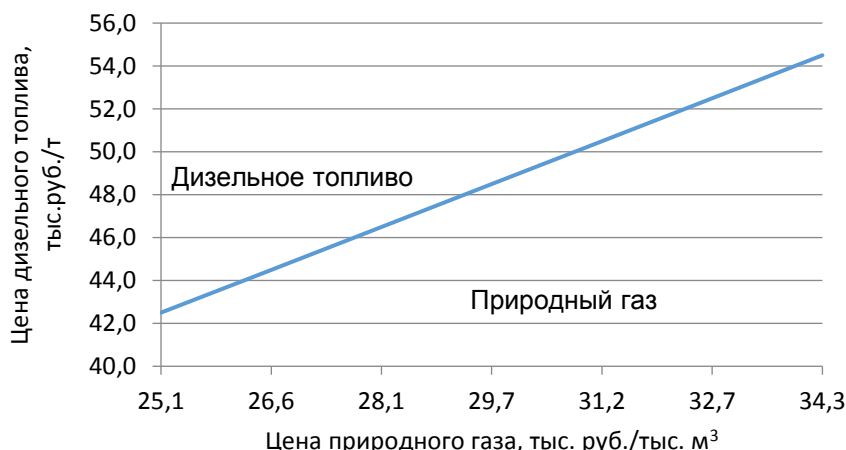
действия исходных факторов (таких как колебание цены природного газа и изменение инвестиций), на экономическую эффективность проекта.

Из графика (рис. 3) видно, что на чувствительность показателя эффективности проекта значительно влияет изменение цены природного газа, а инвестиций – менее всего.

Исследование на равноэкономичность проекта показало область эффективности перевода дизельной электростанции на природный газ (рис. 4).



**Рис. 3. График чувствительности показателя потока денежных средств, млн руб.**  
**Fig. 3. Sensitivity chart of the cash flow indicator, mln rub.**



**Рис. 4. Равноэкономичность варианта перевода действующей дизельной электростанции на природный газ**

**Fig. 4. Equal profitability of the option of the operating diesel power station switch to natural gas**

Данное исследование в полной мере показало, что перевод действующей дизельной электростанции на природный газ оправдывает затраты на ее модернизацию.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время в районах Крайнего Севера осуществляются разработки месторождений углеводородов, а это дает возможность для перевода дизельных электростанций, обеспечивающих изолированные районы электроэнергией, на более доступные и дешевые виды топлива, такие как природный газ.

Природный газ обладает рядом преимуществ перед дизельным топливом, и главные из них – это сокращение затрат на топливо и снижение негативного воздей-

ствия на окружающую среду.

Модернизация дизельных электростанций при переводе на природный газ потребует значительных инвестиций. Для оценки потребуется технико-экономическое обоснование перевода на данный вид топлива.

Для оценки эффективности перевода действующей дизельной электростанции была предложена производственно-финансовая модель, основанная на разнице денежных потоков базового и альтернативного вариантов, результаты расчетов на которой проиллюстрировали высокую эффективность перевода дизельной электростанции на использование природного газа, а также дали возможность оценить практическую значимость данной модели для обоснования таких проектов.

## Библиографический список

1. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Попов С.П., Петров Н.А. Малая энергетика Севера: проблемы и пути развития. Новосибирск: Наука, 2002. 188 с.
2. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Попов С.П. Развитие малой энергетики на северо-востоке России: проблемы, эффективность, приоритеты // Малая энергетика: материалы международной научно-практической конференции (г. Москва, 21–24 ноября 2006 г.). Москва, 2006. 370 с.
3. Беляев Л.С., Лагерева А.В., Посекалин В.В. Энергетика XXI века: условия развития, технологии, прогнозы. Новосибирск: Наука, 2004. 386 с.

4. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Ижбулдин А.К. Автономные энергоисточники на севере Дальнего Востока: характеристики и направления диверсификации // Пространственная экономика. 2018. № 1. С. 101–116.
5. Санеев Б.Г., Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Проблемы энергетики восточной зоны Российской Арктики и возможные пути решения // Синергия Арктики. 2018. № 4. С. 80–88.
6. Лебедев М.П., Слепцов О.И., Кобылин В.П., Шадрин А.П. Проблемы северного завоза органического топлива и роль использования АСММ в условиях

Крайнего Севера // Атомные станции малой мощности: новое направление развития энергетики. М.: Наука, 2011. С. 64–78.

7. Крылов Д.А. Поиск путей оптимального энерго-снабжения изолированных потребителей Республики Саха (Якутия) // Бюллетень по атомной энергии. 2008. № 7. С. 18–21.

8. Моргунова М.О., Цуневский А.Я. Энергия Арктики. М.: Энергия, 2012. С. 41–54.

9. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Ижбулдин А.К., Симоненко А.Н. Освоение минерально-сырьевых ресурсов севера: варианты энергоснабжения // Регион: экономика и социология. 2011. № 4. С. 187–199.

10. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф. Обоснование рациональных вариантов энерго-, топливоснабжения децентрализованных потребителей региона: метод. подход, результаты исследований // Энергетическая политика. 2011. № 4. С. 42–49.

11. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Халгаева Н.А. Развитие систем энергоснабжения изолированных и труднодоступных потребителей // Восточный вектор энергетической стратегии России: современное состояние, взгляд в будущее. Новосибирск: Гео, 2011. С. 207–240.

12. Залманов Л.Р., Крышина Т. М. Перевод дизельных электростанций на газ [Электронный ресурс] // Интернет-журнал «Энергетик». 2014. № 1. URL: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/10> (дата обращения: 14.12.2018).

13. Санеев Б.Г., Платонов Л.А., Майсюк Е.П., Ижбулдин А.К. Комплексное использование природного газа в Байкальском регионе: предпосылки, направления, условия реализации // Регион: экономика и социология. 2012. № 3 (75). С. 190–202.

14. Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Агафонов Г.В. Методы и модели разработки региональных энергетических

программ. Новосибирск: Наука, 2003. 140 с.

15. Бирман Г., Шмидт С. Экономический анализ инвестиционных проектов / пер. с англ. под ред. Л.П. Бельх. М.: Юнити, 1997. 631 с.

16. Красильников А. Подходы к оценке рисков инвестиционных проектов // Проблемы теории и практики управления. М.: Ленанд, 2018. № 1. С. 98–110.

17. Курс «Основы современной энергетики» [Электронный ресурс]. URL: <https://university.ie.corp/> (дата обращения: 26.11.2018).

18. Руководство по энергетической статистике. Франция: Междунар. энергетическое агентство, Организация экон. сотрудничества и развития при содействии Статистического бюро Европейских сообществ (Евростат), 2007 [Электронный ресурс]. URL: [http://www.gks.ru/metod/ManualRussian\\_web.pdf](http://www.gks.ru/metod/ManualRussian_web.pdf) (дата обращения: 26.11.2018).

19. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 256 с.

20. Кидни А. Дж., Парриш У.Р., Маккартни Д. Основы переработки природного газа / пер. с англ. 2-е изд. СПб.: Профессия, 2014. 664 с.

21. Faramawy S., Zaki T., Sakr A.A.-E. Natural gas origin, composition, and processing: A review // Journal of Natural Gas Science and Engineering. 2016, p. 34–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>

22. Viswanathan B. Chapter 3 - Natural Gas. Energy Sources. Fundamentals of Chemical Conversion Processes and Applications. 2017. P. 59–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56353-8.00003-4>

23. Yuanger A.H., Eng H. Natural Gas Processing Principles and Technology. Part 1. 2004. [Электронный ресурс] URL: <http://oilproduction.net/files/Natural%20Gas%20Processing%20Principles%20and%20Technology-Parte%201.pdf> (дата обращения: 09.01.2019)

## References

1. Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Popov S.P., Petrov N.A. *Malaya energetika Severa: problemy i puti razvitiya* [Small-scale power generation of the North: problems and development directions]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2002. 188 p. (In Russ.).

2. Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Popov S.P. *Razvitiye maloy energetiki na severo-vostoke Rossii: problemy, effektivnost', priority* [Development of small-scale power generation in the north-east of Russia: problems, efficiency, priorities]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Malaya energetika"* [Materials of the international scientific and practical conference "Small-scale power generation", Moscow, 21–24 November 2006]. Moscow, 2006, 370 p. (In Russ.).

3. Belyaev L.S., Lagerev A.V., Posekalin V.V. *Energetika XXI veka: usloviya razvitiya, tekhnologii, prognozy* [Energy sector of the XXI century: development conditions, technologies, forecasts]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2004, 386 p. (In Russ.).

4. Saneyev B.G., Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Izhbuldin

A.K. Autonomous energy sources in the north of the Far East: current state and directions of diversification. *Prostranstvennaya ekonomika* [Spatial Economics], 2018, no. 1, pp.101–116. (In Russ.).

5. Saneyev B.G., Ivanova I.YU., Tuguzova T.F. Energy problems of the eastern zone of Russian Arctic and possible solutions. *Sinergiya Arktiki* [Arctic Synergy], 2018, no. 4, pp. 80–88. (In Russ.).

6. Lebedev M.P., Sleptsov O.I., Kobylin V.P., Shadrin A.P. *Problemy severnogo zavoza organicheskogo topliva i rol' ispol'zovaniya ASMM v usloviyakh Kraynego Severa* [Problems of the northern delivery of organic fuels and the role of the use of low power nuclear power plants in the Far North]. *Atomnyye stantsii maloy moshchnosti: novoye napravleniye razvitiya energetiki* [Low power nuclear power plants: a new direction of energy sector development]. Moscow: Nauka Publ., 2011, pp. 64–78. (In Russ.).

7. Krylov D.A. Searching the ways for optimal enrgy sup-



ply of isolated consumers of the Sakha Republic (Yakutia). *Byulleten' po atomnoy energii*, 2008, no. 7, pp. 18–21. (In Russ.).

8. Morgunova M.O., Tsunevskiy A.Ya. *Energiya Arktiki* [Arctic energy]. Moscow: Energiya Publ., 2012, pp. 41–54. (In Russ.).

9. Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F., Izhibuldin A.K., Simonenko A.N. Developing mineral and raw material resources in the north: energy supply variants. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], 2011, no. 4, pp. 187–199. (In Russ.).

10. Ivanova I.Yu., Tuguzova T.F. Substantiation of efficient options of energy and fuel supply of decentralized consumers in the region: methodical approach, results of investigations. *Energeticheskaya politika* [Energy policy], 2011, no. 4, pp. 42–49. (In Russ.).

11. Ivanova I. YU., Tuguzova T.F., Khalgayeva N.A. *Razvitiye sistem energosnabzheniya izolirovannykh i trudnodostupnykh potrebiteley* [Development of power supply systems for isolated and remote consumers]. *Vostochnyy vektor energeticheskoy strategii Rossii: sovremennoye sostoyaniye, vzglyad v budushcheye* [Eastern vector of Russian energy strategy: current state and future outlook]. Novosibirsk: Geo Publ., 2011, pp. 207–240. (In Russ.).

12. Zalmanov L.R., Kryshina T.M. *Perevod dizel'nykh elektrostantsiy na gaz* [Diesel power plants switch to gas]. On-line journal "Energetic". 2014, no. 1. Available at: <http://www.energetik.energy-journals.ru/index.php/EN/article/view/10> (accessed 14 December 2018).

13. Saneyev B.G., Platonov L.A., Maysyuk Ye.P., Izhibuldin A.K. Complex use of natural gas in the Baikal region: background, directions, conditions of sale. *Region: ekonomika i sotsiologiya* [Region: Economics and Sociology], 2012, no. 3 (75), pp. 190–202. (In Russ.).

14. Saneev B.G., Sokolov A.D., Agafonov G.V. *Metody i modeli razrabotki regional'nykh energeticheskikh programm* [Methods and models of regional energy program development]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2003, 140 p. (In Russ.).

15. Birman G., Schmidt S. Economic analysis of investment projects, 1997, 631 p. (Russ. ed.: *Ekonomicheskiy*

*analiz investitsionnykh proyektov*. Moscow, Unity Publ., 1997, 631 p.).

16. Krasil'nikov A. Approaches to investment project risk assessment. *Problemy teorii i praktiki upravleniya* [Problems of management theory and practice]. Moscow: Lenand Publ., 2018, no. 1, pp. 98–110. (In Russ.).

17. *Kurs «Osnovy sovremennoy energetiki»* [Fundamentals of Modern Power Engineering Course]. Available at: <https://university.ie.corp/> (accessed 26 November 2018).

18. *Rukovodstvo po energeticheskoy statistike. Frantsiya: Mezhdunarodnoye energeticheskoye agentstvo, Organizatsiya ekonomicheskogo sotrudnichestva i razvitiya pri sodeystvii Statisticheskogo byuro Yevropeyskikh soobshchestv (Yevrostat)* [Energy statistics guide. France: International Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development with assistance of Statistical Bureau of the European communities (Eurostat)]. 2007. Available at: [http://www.gks.ru/metod/ManualRussian\\_web.pdf](http://www.gks.ru/metod/ManualRussian_web.pdf) (accessed 26 November 2018).

19. Barmin I.V., Kunis I.D. *Szhizhennyy prirodnyy gaz vchera, segodnya, zavtra* [Liquefied natural gas yesterday, today, tomorrow]. Moscow: Publishing House MSTU. N.E. Bauman, 2009. 256 p. (In Russ.).

20. Kidni A. Dzh., Parrish U.R., Makkartni D. Basics of natural gas processing, 2014, 664 p. (Russ. ed.: *Osnovy pererabotki prirodnogo gaza*, St. Petersburg, Profession Publ., 2014, 664 p.).

21. Faramawy S., Zaki T., Sakr A.A.-E. Natural gas origin, composition, and processing: A review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. pp. 34–54. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.06.030>

22. Viswanathan B. Chapter 3 - Natural Gas. *Energy Sources. Fundamentals of Chemical Conversion Processes and Applications*. 2017. pp. 59–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-56353-8.00003-4>

23. Yuanger A.H., Eng H. *Natural Gas Processing Principles and Technology*. – Part 1. 2004. URL: <http://oilproduction.net/files/Natural%20Gas%20Processing%20Principles%20and%20Technology-Parte%201.pdf> (09.01.2019).

#### Критерии авторства

Абдулина Е.Р. получила и оформила научные результаты и несет ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Abdulina E.R. has obtained and formalized the scientific results 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.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Абдулина Елена Равильевна**,  
аспирант,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: [abdulinaelena@mail.ru](mailto:abdulinaelena@mail.ru)

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Elena R. Abdulina**,  
Postgraduate student,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: [abdulinaelena@mail.ru](mailto:abdulinaelena@mail.ru)



Оригинальная статья / Original article

УДК 621.165

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-503-515>

## Усовершенствованная методика идентификации математических моделей теплоэнергетического оборудования

© В.Э. Алексеюк, А.С. Максимов, П.Г. Сафронов

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель данной работы – описание усовершенствованной методики идентификации (настройки, верификации) параметров математических моделей сложного теплоэнергетического оборудования. Данная методика позволяет более эффективно выявлять грубые погрешности измерений контрольных параметров, используемых для идентификации математической модели эксплуатируемого оборудования, оценивать корректность и исправлять ошибки построения самой математической модели, повышать точность идентификации. Кроме того, в статье описывается оригинальный подход учета влияния нагрузки энергоблока на внутренние относительные коэффициенты отсеков турбины, которую можно применять и для других настраиваемых коэффициентов математической модели, нелинейно зависящих от режима работы оборудования. Усовершенствованная методика идентификации математических моделей была апробирована на построенной автором подробной математической модели современного энергоблока мощностью 225 МВт. В статье приводятся результаты решения задачи идентификации математической модели энергоблока и пример оптимизационного расчета реального режима работы с целью снижения удельного расхода топлива на выработку электроэнергии.

**Ключевые слова:** идентификация параметров, математическое моделирование, оптимизация режимов работы, оценивание состояния, угольный энергоблок

**Благодарности:** Исследование выполнено в рамках научного проекта III.17.1.1. программы фундаментальных исследований СО РАН, рег. № AAAA-A17-117030310433-6 в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН.

**Информация о статье:** Дата поступления 4 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 10 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Алексеюк В.Э., Максимов А.С., Сафронов П.Г. Усовершенствованная методика идентификации математических моделей теплоэнергетического оборудования. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):503–515. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-503-515

## Improved identification methods for thermal power equipment mathematical models

Vitaliy E. Alekseyuk, Aleksei S. Maksimov, Pavel G. Safronov

*Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of this work is to describe an improved procedure for parameter identification (adjustment, verification) of mathematical models of complex thermal power equipment. This procedure allows more efficient detection of gross errors in measurements of control parameters used for the identification of the mathematical model of the operated equipment. It also evaluates the accuracy and allows to correct the construction errors of the model itself increasing identification accuracy. Besides, the paper describes an original approach to consideration of the effect of a generating unit load on the internal relative efficiencies of turbine compartments. It can be applied to other adjustable coefficients of the mathematical model with the nonlinear dependence on equipment operation modes. The improved identification methods of mathematical models have been tested on the detailed mathematical model of the contemporary 225 MW generating unit designed by the author. The article presents the results of solving the identification problem of the generating unit mathematical model and an example of the optimization calculation of the real operation mode aimed at decreasing specific fuel consumption for electricity generation.

**Keywords:** parameter identification, mathematical modeling, optimization of operation modes, state estimation, coal-fired generating unit

**Acknowledgements:** The study has been carried out within the framework of the scientific project III.17.1.1. of the basic research program of SB RAS, reg. No. AAAA-A17-117030310433-6 at the Melentiev Energy Systems Institute SB RAS.

**Information about the article:** Received February 4, 2019; accepted for publication March 10, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Alekseyuk V.E., Maksimov A.S., Safronov P.G. Improved identification methods for thermal power equipment mathematical models. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):503–515. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-503-515

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Задачи повышения энергетической и экономической эффективности работы основного теплоэнергетического оборудования на тепловых электрических станциях, без сомнения, являются актуальными и заслуживающими внимания. Это следует из того, что теплоэнергетические установки составляют основу электроэнергетики Российской Федерации и потребляют значительную часть добываемого органического топлива и других ресурсов.

Современные теплоэнергетические установки (такие как котельные агрегаты и паровые турбины) представляют собой технические системы, обладающие весьма сложными технологическими схемами, отличающимися элементарным составом и режимами функционирования. Ввиду этого основными инструментами исследования эксплуатации теплоэнергетического оборудования являются методы математического моделирования и схемно-параметрической оптимизации.

Стоит отметить, что эффективность работы оборудования напрямую зависит от режимов эксплуатации и его оперативного управления. В свою очередь для повышения эффективности управления основным оборудованием электростанции оперативному персоналу нужно иметь «обратную связь», т.е. отслеживать, как изменяются параметры оборудования и его показатели, которые трудно или невозможно измерить (расход сжигаемого топлива, коэффициент полезного действия (КПД) энергоблока, удельный расход топлива и др.) при изменении управляющих воздействий.

Известно, что фактическое состояние теплоэнергетического оборудования теплоэлектростанции (ТЭС) меняется в ходе эксплуатации. При этом может происходить засорение солями проточной части

турбины, загрязнение теплообменных поверхностей котла, регенеративных подогревателей и другие изменения, оказывающие негативное влияние на режим работы оборудования. Следовательно, при оперативном управлении режимами работы станции важной является задача оценивания состояния основного теплоэнергетического оборудования.

Основы применения методов математического моделирования и оптимизации теплоэнергетического оборудования и тепловых электрических станций были заложены в ранних работах ученых Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. В работах Г.Б. Левенталя и Л.С. Попырина [1, 2] рассмотрены задачи оптимизации непрерывных и дискретных параметров теплоэнергетических установок (ТЭУ) различных типов и технологических схем, изложены принципы автоматизации математического моделирования ТЭУ и даны подходы к оптимизации ТЭУ в условиях неоднозначности исходной информации. Методы математического моделирования ТЭУ были развиты в работах других российских ученых: Ф.А. Вульмана [3], А.А. Палагина [4], В.М. Боровикова [5].

В области исследования электроэнергетических систем вопросы оценивания состояния и идентификации математических моделей при расчетах режимов работы с учетом погрешностей измерений исследовались А.З. Гаммом и его коллегами. В труде [6] рассмотрены подходы к выявлению грубых погрешностей измерений, называемых «плохими» замерами, основанных на методе контрольных уравнений.

Оценивание состояния и идентификация параметров математических моделей выполняются и при исследовании трубопроводных систем. Среди работ можно отметить труд Н.Н. Новицкого [7], в котором представлено комплексное рассмотрение



ряда задач и методов оценивания состояния, разработанных с учетом специфики гидравлических цепей.

Одними из первых работ в области теплоэнергетики, где поднималась данная тема, являются труды Г.В. Ноздренко, Ю.В. Овчинникова [8] и Г.Д. Крохина, М.Я. Супруненко [9]. В них предлагается методика согласования уравнений теплового и энергетического балансов для решения задачи оценивания состояния. Однако в данных работах отсутствует постановка и решение задачи идентификации контрольных параметров, которые не поддаются прямому измерению, а также не изучены вопросы взаимосвязи оптимальных решений с погрешностью измерений.

Недостаточно широкое применение эффективных методов математического моделирования и их использование при управлении режимами работы ТЭС обусловлены рядом трудностей, среди которых можно отметить значительную сложность математических моделей современных ТЭУ и необходимость настройки этих моделей на изменяющемся в течение времени фактическом состоянии оборудования.

Таким образом, задачи оценивания состояния режимов работы теплоэнергетических систем и идентификации параметров математических моделей практически не нашли приемлемого решения из-за сложности объектов исследования и их математических моделей, а также в связи с отсутствием эффективных методов, алгоритмов и компьютерных программ решения необходимых математических задач. Результаты решения вышеперечисленных задач имеют важное самостоятельное значение и играют важную роль для качественного решения проблем управления ТЭУ, например, для оптимального распределения нагрузок между агрегатами ТЭС и оптимального управления режимами работы ТЭУ и ТЭС.

В отделе теплосиловых систем Института систем энергетики им. Л.А. Мелентьева (ИСЭМ СО РАН) накоплен богатый опыт исследования сложных теплоэнергетических установок и тепловых электрических станций. Данная работа является про-

должением работ ученых ИСЭМ СО РАН по идентификации математических моделей и оцениванию состояния основного теплоэнергетического оборудования ТЭС. Среди ранних работ выделяются труды А.М. Клера и Н.П. Декановой [10, 11], в которых рассматриваются подходы к оптимизации математических моделей ТЭУ при оперативном управлении режимами теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). В работе А.В. Михеева предлагается согласованная методика диагностики исследуемого оборудования, основанная на совместном решении экстремальных оптимизационных задач оценивания состояния и идентификации характеристик ТЭУ [12]. Более того, в работе [13] предложен подход к повышению качества исходной информации за счет исключения погрешностей в измеренных параметрах. Исследования А.М. Клера, А.С. Максимова и Е.Л. Степановой [14, 15] являются одними из последних работ, посвященных данной тематике. В них рассматривается разработка «высокоскоростных» математических моделей основного оборудования ТЭС, позволяющих выполнять сложные оптимизационные расчеты режимов работы агрегатов ТЭЦ, а также описывается методика настройки математических моделей под реальное состояние исследуемого оборудования. Данная методика позволяет настроить коэффициенты математической модели таким образом, чтобы результаты, получаемые с помощью математической модели, как можно более точно соответствовали фактическому состоянию оборудования, что обеспечивает обоснованность оптимизационных решений.

При использовании вышеизложенных методик были обнаружены присущие им недостатки, которые не позволили успешно решить задачу идентификации исследуемого авторами оборудования. В-первых, задача идентификации решается успешно, когда среди замеренных параметров отсутствуют грубые ошибки измерения. Но, если среди замеров присутствуют «плохие» с грубыми ошибками измерения в каком-либо из рассматриваемых режимов работы, то данные ошибки перераспределя-

ются между различными измеряемыми параметрами в одном режиме работы и, что важнее, между различными режимами. Такое перераспределение не позволяет однозначно определить ошибочный замер и приводит к неверным решениям. Во-вторых, вышеизложенные методики не учитывают погрешности непосредственно самой математической модели исследуемого оборудования. Модели основного теплоэнергетического оборудования ТЭС основаны на нормативных методах расчета и не всегда описывают реальные процессы с достаточной точностью. Это вносит дополнительные погрешности, которые должны быть учтены при решении задачи идентификации.

## 2. ОПИСАНИЕ УСОВЕРШЕНСТВОВАННОЙ МЕТОДИКИ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

В настоящей работе предлагается разработать новую усовершенствованную методику идентификации. Суть идеи заключается в следующем: на основе существующих методик идентификации математических моделей разработать новую комплексную методику, состоящую из 3 этапов (для решения вышеизложенных проблем и повышения точности решения задачи идентификации математических моделей).

Состав параметров математической модели для решения задачи идентификации можно условно разделить следующим образом: параметры, измеряемые на установке и являющиеся информационно-входными для математической модели  $x_3$ ; измеряемые параметры, являющиеся информационно-выходными для математической модели  $u_3$ ; параметры, которые не измеряются на реальной установке, но являются информационно-входными для модели  $x_H$ . Состав массива настраиваемых коэффициентов  $\theta$  математической модели подбирается индивидуально для каждой модели. Они необходимы для влияния на физические процессы, происходящие в элементах математической модели. Обычно используются такие пара-

метры как коэффициенты тепловой эффективности поверхностей теплообмена котла, гидравлические сопротивления теплообменников, внутренние относительные коэффициенты отсеков турбины и др.

**На первом этапе** решения задачи идентификации предлагается выявлять и исключать из дальнейшего расчета неточные замеры параметров. Неточными являются значения тех измеренных параметров, которые находятся за пределами заявленной точности средств измерений, использованных во время испытаний. Для выявления таких замеров предлагается решать задачу минимизации коэффициента  $\psi$  (уравнения 4, 5) для каждого из рассматриваемых режимов работы оборудования по отдельности. Коэффициент  $\psi$  соответствует модулю максимально относительного отклонения среди измеряемых параметров. Математическая постановка первого этапа идентификации имеет следующий вид:

$$\min_{x_H^1, x_3^1, \theta, \psi} \psi \quad (1)$$

при условиях:

$$H(y, x_H, x_3, \theta) = 0; \quad (2)$$

$$G(y, x_H, x_3, \theta) \geq 0; \quad (3)$$

$$x_{3j} - \psi \cdot \sqrt{\sigma_{xj}^2} \leq \bar{x}_{3j} \leq x_{3j} + \psi \cdot \sqrt{\sigma_{xj}^2}; \quad (4)$$

$$y_{3k} - \psi \cdot \sqrt{\sigma_{yk}^2} \leq \bar{y}_{3k} \leq y_{3k} + \psi \cdot \sqrt{\sigma_{yk}^2}, \quad (5)$$

где  $H$  – функция ограничений равенств, включающая в себя все уравнения математической модели и входящих в ее состав элементов;  $G$  – функция ограничений неравенств, учитывающая физические и режимные ограничения на работу реального оборудования;  $\psi$  – коэффициент, равный модулю максимального относительного отклонения параметров (с верхней чертой – параметры, рассчитываемые с помощью математической модели, без черты – параметры, полученные при измерении на реальном



оборудовании);  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_y^2$  – дисперсия погрешности замера относительно вектора  $x_3$  и вектора  $y_3$ .

Указанные выше дисперсии погрешностей замеров определяются из выражения:

$$\sigma^2 = \left( \frac{XB \cdot \alpha}{3 \cdot 100} \right)^2, \quad (6)$$

где  $XB$  – верхний предел измерения прибора;  $\alpha$  – класс точности прибора (в %).

Погрешности измерений контролируемых параметров энергоблока подчиняются нормальному закону распределения погрешностей. Согласно центральной предельной теореме закон распределения суммы независимых случайных величин с конечными дисперсиями (независимо от их закона распределения) стремится к нормальному при увеличении числа слагаемых [16]. Применительно к измерениям это означает, что нормальное распределение случайных погрешностей возникает тогда, когда на результат измерения действует множество случайных возмущений, ни одно из которых не является преобладающим.

В данной работе используется так называемое правило «трех сигм», так как доверительная вероятность в данном случае равняется 0,997. Это позволяет с достаточным основанием утверждать, что все возможные случайные погрешности измерения, распределенные по нормальному закону, практически не превышают по абсолютному значению  $3\sigma$ . В уравнениях (4), (5), (10), (11) вместо множителя равного 3 используется минимизируемый коэффициент  $\psi$ , изначально задаваемый большим числом 50–100. Это необходимо для того, чтобы учесть не только погрешности используемых средств измерений, но и погрешности методики расчета и математических моделей. В процессе оптимизационного расчета (1) этот коэффициент стремится к значению 3, но на практике он зачастую принимает несколько большее значение. Таким образом, в данной методике можем оценить, какую дополнительную по-

грешность привносит в расчет несовершенство нормативных методов расчета и упрощения, закладываемые в математическую модель исследуемой ТЭУ.

Для определения ошибочных замеров необходимо найти активные ограничения на отклонение значения измеряемого параметра от вычисляемого. Значение замера, входящего в это ограничение, может быть помечено как ошибочное и быть исключенным из дальнейшего рассмотрения. Как показали исследования, такой подход позволяет более эффективно находить ошибки измерения и минимизирует перераспределение ошибочных измерений между параметрами в различных режимах.

**На втором этапе** усовершенствованной методики идентификации математическая модель исследуемого оборудования проверяется на предмет ошибок моделирования.

Постановка оптимизационной задачи подобна задаче, выполняемой на первом этапе, за исключением того, что она решается для всех рассматриваемых режимов совместно (о чем свидетельствует индекс  $i$ , характеризующий порядковый номер режима работы оборудования).

Постановка задачи имеет следующий вид:

$$\min_{x_H^i, x_3^i, \theta, \psi} \psi, \quad (7)$$

при условиях

$$H(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) = 0; \quad (8)$$

$$G(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) \geq 0; \quad (9)$$

$$x_{3j}^i - \psi \cdot \sqrt{\sigma_{xj}^2} \leq \bar{x}_{3j}^i \leq x_{3j}^i + \psi \cdot \sqrt{\sigma_{xj}^2}; \quad (10)$$

$$y_{3k}^i - \psi \cdot \sqrt{\sigma_{yk}^2} \leq \bar{y}_{3k}^i \leq y_{3k}^i + \psi \cdot \sqrt{\sigma_{yk}^2}. \quad (11)$$

Исследования показали, что решение данной задачи позволяет выявить некорректное описание математической моде-

лю процессов, протекающих в энергоустановке. Если в результате решения имеются параметры, отклонение которых от замеров в разных режимах работы оборудования значительно отличается, то это говорит об отсутствии необходимого коэффициента в списке уточняемых или свидетельствует о неточности построения самой математической модели. Кроме того, незначительные потоки теплоносителей, которыми пренебрегли во время построения математической модели исследуемого оборудования, могут внести дополнительную погрешность при идентификации. Поэтому на данном этапе расчетов есть возможность внести необходимые изменения в структуру модели, описывая особенности теплоэнергетического оборудования.

**На третьем этапе** идентификации математической модели решается оптимизационная задача, которая имеет следующий вид:

$$\min_{x_H^i, x_3^i, \theta} f(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) \quad (12)$$

при условиях:

$$H(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) = 0; \quad (13)$$

$$G(y^i, x_H^i, x_3^i, \theta) \geq 0; \quad (14)$$

$$x_{3j}^i - \psi \cdot \sqrt{\sigma_{xj}^2} \leq \bar{x}_{3j}^i \leq x_{3j}^i + \psi \cdot \sqrt{\sigma_{xj}^2}; \quad (15)$$

$$y_{3k}^i - \psi \cdot \sqrt{\sigma_{yk}^2} \leq \bar{y}_{3k}^i \leq y_{3k}^i + \psi \cdot \sqrt{\sigma_{yk}^2}; \quad (16)$$

$$f = \sum_{i=1}^R \left[ \sum_{j=1}^N \frac{(x_{3j}^i - \bar{x}_{3j}^i)^2}{\sigma_{xj}^2} + \sum_{k=1}^M \frac{(y_{3k}^i - \bar{y}_{3k}^i)^2}{\sigma_{yk}^2} \right], \quad (17)$$

где  $f$  – целевая функция, представленная в уравнении 17 (с верхней чертой – параметры, рассчитываемые с помощью математической модели; без черты – параметры, полученные при измерении на реальном оборудовании);  $R$  – количество рассчитываемых режимов;  $N$  – размерность векторов  $x_3$ ;

$M$  – размерность векторов  $y_3$ .

Третий этап идентификации необходим с целью максимально возможного сближения работы реального оборудования и расчетов математической модели. Целевая функция  $f$  (17) в отличие от коэффициента  $\psi$  (1, 7) представляет собой сумму квадратов относительных невязок контролируемых параметров во всех рассматриваемых режимах работы оборудования. Соответственно, на третьем этапе можно добиться снижения всех относительных невязок измеряемых параметров, а не только максимальной невязки, как на втором этапе. После завершения идентификации значения настраиваемых коэффициентов математической модели  $\theta$  фиксируются и не подлежат дальнейшим изменениям, а математическая модель считается настроенной на фактическое состояние оборудования.

Следует подчеркнуть, что все этапы идентификации решаются строго последовательно и учитывают внесенные на предыдущих этапах в математической модели изменения.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДУЕМОГО ЭНЕРГОБЛОКА

В данной работе в качестве прототипа для математической модели был выбран современный энергоблок, установленный на Харанорской ГРЭС (п. Ясногорск, Забайкальский край). В его состав входит паровая турбоустановка К-225-12,8-3Р с промежуточным перегревом пара мощностью 225 МВт и котельный агрегат высокого давления ЕП-630-13,8-565 БТ паропроизводительностью 630 т/ч. Более подробное описание технологических схем и математических моделей турбоустановки и котельного агрегата приводится в специализированных статьях авторов [17, 18].

Математическая модель энергоблока была построена авторами с помощью программно-вычислительного комплекса (ПВК), разработанного в ИСЭМ СО РАН, «Система машинного построения программ» [19]. Расчетная схема энергоблока



состоит из 100 элементов и 169 связей между ними. Полученная математическая модель содержит 1154 информационно-входных, 1420 информационно-выходных параметров, из которых 40 параметров являются итерационно-вычисляемыми и требуют задания начального приближения.

Далее приводятся результаты расчетов, выполненных с помощью разработанной авторами усовершенствованной методики идентификации математической модели теплоэнергетического оборудования применительно к существующему энергоблоку, описанному выше.

Необходимые для идентификации математической модели значения измеряемых параметров в контрольных точках схемы были взяты из предоставленной инженерным персоналом электростанции выгрузки показаний датчиков. Класс точности использованных средств измерения составляет для приборов, измеряющих давление – 1%, температуры – 2%, расхода – 1,5%. Для расчетов было отобрано несколько режимов работы энергоблока, каждый из которых содержит 55 замеренных значений параметров в различных точках технологической схемы.

На первом этапе идентификации выполнялась минимизация коэффициента  $\psi$ . Для каждого из режимов по отдельности была сформирована оптимизационная задача, в которой количество оптимизируемых параметров составило 67, а суммарное количество ограничений-неравенств – 234. На данном этапе было выявлено 3 замера в двух режимах, значения которых содержали грубые погрешности измерений. Первый параметр – давление пара на входе в 6-й отсек турбины – был исключен из расчета в двух режимах, а температура пара – на выходе из 3 отсека турбины только в одном режиме.

Для доказательства обоснованности исключения замера температуры пара на выходе из 3 отсека турбины можно привести  $h,s$ -диаграмму процесса расширения в первых пяти отсеках для рассматриваемого режима, построенную по замеренным значениям параметров. Диаграмма изображена на рис. 1. Цифры на графике указывают на

номер отсека турбины, на выходе из которого замерялась температура пара. Очевидно, что термодинамически невозможно получить внутренний относительный КПД отсека турбины больше 100% (наклон в сторону уменьшения энтропии). Следовательно, данный замер во втором режиме является неточным и его следует исключить из дальнейших расчетов.

Подобным образом был проверен замер давления пара на входе в 6-й отсек турбины, который соответствует давлению пара (отбора на регенеративный подогреватель низкого давления ПНД-3). Судя по замерам, для этих режимов он составляет примерно  $\sim 0,255$  МПа (2,6 кгс/см<sup>2</sup>). При данном давлении температура насыщения составляет 128°C, а замер температуры воды на выходе из ПНД-3 примерно 140°C. Очевидно, что невозможно нагреть воду, проходящую через данный регенеративный подогреватель выше температуры насыщения при данном давлении. Следовательно, необходимо исключить этот замер из дальнейших расчетов.

После исключения неточных измерений, выполненных на первом этапе идентификации, на втором этапе математическая модель исследуемого энергоблока была проверена на предмет ошибок моделирования. Постановка оптимизационной задачи подобна задаче, выполняемой на первом этапе (за исключением того, что она решалась для всех рассматриваемых режимов совместно). Количество оптимизируемых параметров этой задачи составило 82, а суммарное количество ограничений-неравенств – 605.

На данном этапе была апробирована оригинальная идея учета влияния изменения мощности турбины (или расхода пара на входе в турбину) на эффективность ее отсеков. Известно, что внутренний относительный КПД отсеков турбины не является постоянной величиной, а меняет свое значение в зависимости от нагрузки турбины. Так, в режимах работы близким к номинальным он будет выше, чем в режимах с более высокой или низкой нагрузкой.

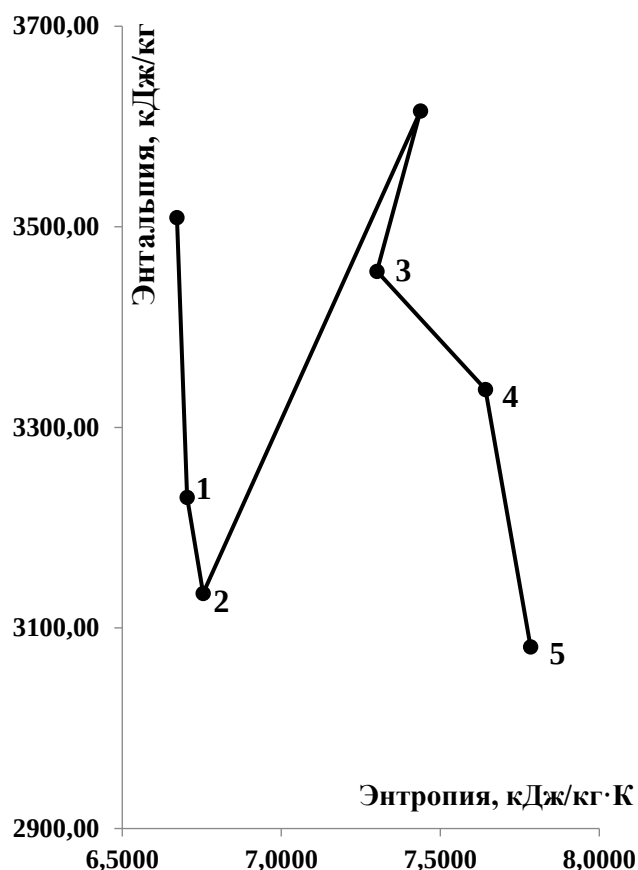


Рис. 1. Процесс расширения пара в первых отсеках турбины в  $h,s$ -диаграмме  
Fig. 1. Steam expansion in the first compartments of a turbine in the  $h,s$ -diagram

Отсек турбины представляет собой группу ступеней между отборами пара. Математическая модель отсека турбины состоит из нескольких уравнений (13–16). Основными расчетными параметрами для отсека являются: давление пара на входе  $P_1$ , энтальпия пара на выходе  $H_2$  и вырабатываемая отсеком механическая мощность  $N_M$ .

Давление  $P_1$  определяется по известной формуле Стодоль-Флюгеля. В данной формуле индекс 1 указывает на значения параметров на входе в отсек, а индекс 2 – на выходе. Параметры пара в номинальном (или в каком-либо характерном) режиме обозначаются звездочкой.

$$P_1 = \sqrt{\frac{G^2 \cdot P_1 \cdot V_1 \cdot (P_1^2 - P_2^2)}{G^{*2} \cdot P_1^* \cdot V_1^*}} + P_2^2, \quad (18)$$

где  $P$  – давление пара;  $G$  – расход пара через отсек;  $V$  – удельный объем пара.

Энтальпия  $H_2$  определяется через

идеальный теплоперепад с учетом внутреннего относительного КПД цилиндра турбины. В отсеках турбины, в которых образуется влажный пар, также учитывается влияние степени влажности пара на снижение эффективности отсека

$$H_2 = H_1 - (H_1 - H_2^*) \cdot \eta_i, \quad (19)$$

где  $H_1$  – энтальпия пара перед отсеком;  $H_2^*$  – энтальпия пара в конце идеального расширения до давления  $P_2$ ;  $\eta_i$  – внутренний относительный КПД.

$$N_M = G \cdot (H_1 - H_2) \cdot \eta_m, \quad (20)$$

где  $\eta_m$  – механический КПД отсека.

В отличие от всех предыдущих работ, где настраивались внутренние относительные коэффициенты эффективности каждого из отсеков турбины, в данной работе были использованы квадратичные

функции, в которых в качестве переменной выступало отношение фактического расхода пара через отсек ( $G$ ) к номинальному расходу ( $G^*$ ). Коэффициенты  $A, B, C$  уравнения 16 являются общими для каждого из цилиндров турбины (ЦВД, ЦСД, ЦНД), но коэффициенты  $\eta_i$  определяются для каждого отсека в зависимости от нагрузки турбины в разных режимах работы

$$\eta_i = A \cdot \left( \frac{G}{G^*} \right)^2 + B \cdot \left( \frac{G}{G^*} \right) + C. \quad (21)$$

Пример полученной зависимости внутренних относительных КПД двух первых отсеков турбоустановки от ее нагрузки приведен на рис. 2.

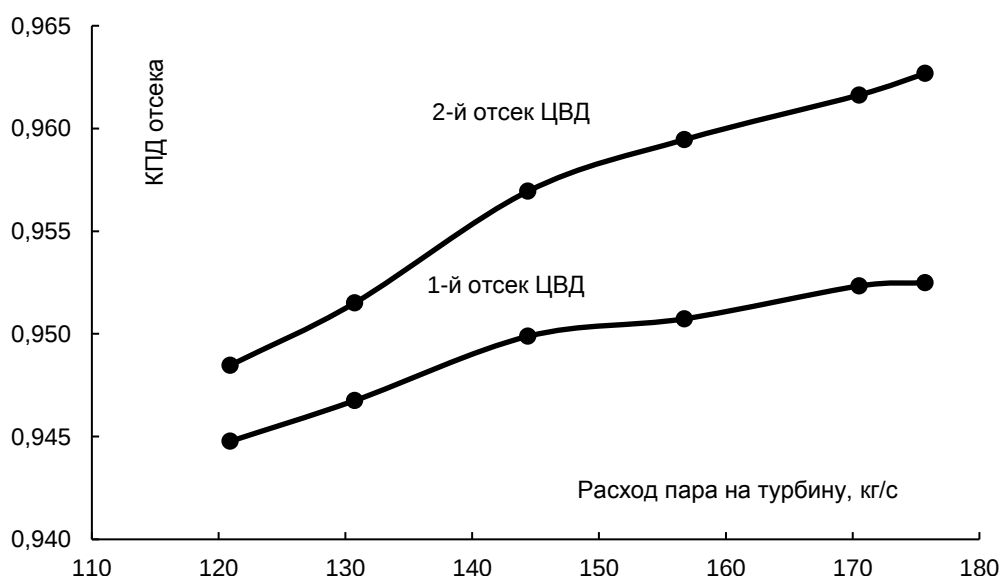
Более того, расчеты, выполненные на втором этапе идентификации, показали, что некоторые параметры в деаэраторе заметно отклонялись от замеров. В связи с этим было принято решение изменить математическую модель данного элемента. Оптимизируемый коэффициент дросселирования пара в деаэраторе был заменен квадратичной функцией вида  $k_d = A \cdot x^2 + B \cdot x + C$ , где  $x$  – расход питательной воды в деаэраторе, характеризующий режим работы тур-

бины;  $A, B, C$  – новые оптимизируемые коэффициенты. Такое изменение позволило настроить математическую модель деаэратора с учетом влияния изменения мощности турбины в различных режимах работы, что улучшило точность идентификации модели энергоблока.

Вышеизложенные изменения, выполненные на втором этапе решения задачи идентификации, позволили минимизировать целевую функцию (коэффициент  $\psi$ ) до значения 3,81, что немного превышает пороговое значение, но является допустимым.

На третьем этапе идентификации была решена оптимизационная задача (12) с целевой функцией (17). Количество оптимизируемых параметров данной задачи составило 81, а суммарное количество ограничений-неравенств – 605. Минимизируемый на втором этапе идентификации коэффициент  $\psi$  был исключен из списка оптимизируемых, а его значение было зафиксировано.

После завершения третьего этапа идентификации значения настраиваемых коэффициентов математической модели  $\theta$  были зафиксированы, а математическая модель рассматривалась как настроенная на фактическое состояние оборудования.



**Рис. 2. Зависимость внутренних относительных коэффициентов полезного действия двух первых отсеков турбоустановки от ее нагрузки**

**Fig. 2. Relationship between the internal relative efficiencies of two first compartments of a turbine and its load**

Идентификация математической модели исследуемого оборудования, кроме всего прочего, позволяет решать ряд важных эксплуатационных задач: например, оценивать состояние теплоэнергетического оборудования или выполнять расчеты по схемно-параметрической оптимизации режимов работы исследуемого оборудования ТЭС с целью повышения эффективности его работы. Разовый расчет режима работы на настроенной математической модели энергоблока выполняется в течение нескольких секунд (3–5 с), что позволяет использовать ее в оперативном управлении энергоблоком.

В качестве примера оптимизационного расчета можно привести расчет, выполненный на идентифицированной математической модели энергоблока. В качестве

целевой функции был выбран расход сжигаемого в котельном агрегате топлива. Массив ограничений-неравенств состоял как из физических ограничений (на температуру металла труб, механическое напряжение металла, неотрицательность расходов пара и др.), так и режимных (температура первичного и вторичного пара, давление в конденсаторе, мощность турбины). В табл. 1 приведены состав и значения оптимизируемых параметров (строки 1–9), а также значения показателей эффективности работы энергоблока (строки 10–13) в одном из рассматриваемых выше и в оптимальном режиме, полученном в результате оптимизационного расчета. Оптимизационный расчет математической модели энергоблока выполнялся в течение нескольких десятков минут (30–60 мин в зависимости от задачи).

**Пример оптимизации режима работы энергоблока**  
**An example of generating unit operation mode optimization**

| Параметр, единица измерения                                                                       | Реальный режим | Оптимальный режим |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|-------------------|
| Расход сжигаемого в котле топлива, кг/с                                                           | 34,22          | 33,38             |
| Коэффициент избытка воздуха в топке котла                                                         | 1,31           | 1,205             |
| Уменьшение энтальпии в 1-м впрыске, ккал/кг (кДж/кг)                                              | 8,54 (35,76)   | 1,27 (5,31)       |
| Уменьшение энтальпии во 2-м впрыске, ккал/кг (кДж/кг)                                             | 7,29 (30,52)   | 0,37 (1,54)       |
| Уменьшение энтальпии в 3-м впрыске, ккал/кг (кДж/кг)                                              | 2,54 (10,63)   | 2,45 (10,25)      |
| Уменьшение энтальпии во впрыске НД, ккал/кг (кДж/кг)                                              | 27,93 (116,93) | 3,61 (15,11)      |
| Напор питательного насоса, кгс/см <sup>2</sup> (МПа)                                              | 168,95 (16,57) | 179,11 (17,56)    |
| Сопротивление задвижки проходящего через регулируемую поверхность пара, кгс/см <sup>2</sup> (МПа) | 0,673 (0,063)  | 0,31 (0,03)       |
| Расход охлаждающей воды на входе в конденсатор, кг/с                                              | 10419          | 9825              |
| Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии (брутто), г у.т./кВт·ч              | 305,01         | 297,89            |
| Удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии (нетто), г у.т./кВт·ч               | 333,39         | 319,86            |
| КПД энергоблока брутто                                                                            | 40,28          | 41,24             |
| КПД энергоблока нетто                                                                             | 36,85          | 38,41             |



Как видно из таблицы, влияя на режимные параметры энергоблока, можно добиться заметного снижения количества топлива, сжигаемого в котельном агрегате, при той же выработке электроэнергии, что несколько повышает эффективность работы данного энергоблока. В приведенном выше примере удельный расход условного топлива на выработку электроэнергии (режим 225 МВт) снизился на 4%, в основном за счет снижения количества охлаждающей воды во впрыск вторичного пара и уменьшения коэффициента избытка воздуха в топке котельного агрегата.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье было приведено описание усовершенствованной авторами методики идентификации математических моделей сложного теплоэнергетического оборудования. Данная методика, как показали расчеты, позволяет (более эффективно):

- выявлять грубые погрешности измерений контрольных параметров, используемых для идентификации математической модели исследуемого оборудования;

- оценивать корректность и исправлять ошибки построения самой математической модели;

- повышать точность решения задачи идентификации.

Кроме того, в статье описан оригинальный подход учета влияния нагрузки энергоблока на внутренние относительные коэффициенты отсеков турбины, которую можно применять и для других настраиваемых коэффициентов математической модели, нелинейно зависящих от режима работы оборудования. Это позволяет повысить точность настройки математических моделей ТЭУ.

Усовершенствованная методика идентификации математических моделей была апробирована на построенной авторами подробной математической модели современного энергоблока мощностью 225 МВт. В статье приведены результаты решения задачи идентификации математической модели энергоблока, а также представлен пример оптимизационного расчета реального режима работы с целью снижения удельного расхода условного топлива на выработку электроэнергии и повышения КПД установки.

#### Библиографический список

1. Левенталь Г.Б., Попырин Л.С. Оптимизация теплоэнергетических установок. М.: Энергия, 1970. 352 с.
2. Попырин Л.С., Самусев В.И., Эпельштейн В.В. Автоматизация математического моделирования теплоэнергетических установок. М.: Наука, 1981. 236 с.
3. Вульман Ф.А., Корягин А.В., Кривошей М.З. Математическое моделирование тепловых схем паротурбинных установок на ЭВМ. М.: Машиностроение, 1985. 112 с.
4. Палагин А.А. Автоматизация проектирования теплосиловых схем турбоустановок. Киев: Наукова думка, 1983. 160 с.
5. Боровиков В.М., Казаров С.А., Кутахов А.Г., Романов С.Н. Автоматизированное проектирование тепловых схем и расчет переменных режимов ПТУ ТЭС и АЭС // Теплоэнергетика. 1993. № 3. С. 5–9.
6. Гамм А.З., Колосок И.Н. Обнаружение плохих данных в телеизмерениях для АСДУ ЭЭС на основе контрольных уравнений. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1998. 49 с.
7. Новицкий Н.Н. Оценка параметров гидравлических цепей. Новосибирск: Наука, 1998. 214 с.
8. Ноздренко Г.В., Овчинников Ю.В. Оптимизация внутристанционных режимов ТЭЦ в системе АСУ ТП // Задачи и методы управления ЭС: сб. трудов. Новосибирск, 1982. С. 21–27.
9. Крохин Г.Д., Супруненко М.Я. Диагностика состояния энергоустановок ТЭС (постановка экспериментов) // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-96: труды III Междунар. науч.-техн. конф. (г. Новосибирск, 01 сентября – 31 октября 1996 г.). Новосибирск, 1996. Т. 5. С. 105–111.
10. Деканова Н.П., Клер А.М. Проблемы оптимизации при исследовании теплоэнергетических установок // Приближенные методы анализа и их приложения. Иркутск, 1989. С. 22–43.
11. Клер А.М., Деканова Н.П., Михеев А.В. Задачи оптимизации при оперативном управлении режимами работы ТЭЦ // Методы оптимизации и их приложения: тезисы докладов X Байкальской школы-семинара (г. Иркутск, 1995 г.). Иркутск, 1995. С. 80–84.
12. Михеев А.В. Оценка состояния и идентификация параметров парового котла ТП-81 (ТЭЦ-9) // Системные исследования в энергетике: тр. молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Иркутск, 1999. Вып. 29. С. 143–148.
13. Деканова Н.П., Михеев А.В. Обнаружение плохих измерений параметров функционирования ТЭЦ //

Методы оптимизации и их приложения: материалы XI Байкальской школы-семинара (г. Иркутск, 05–12 июля 1998 г.). Иркутск, 1998. С. 79–82.

14. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. High-speed mathematical models of cogeneration steam turbines: optimization of operation in heat and power plants // *Thermophysics and Aeromechanics*. 2006. Vol. 13. No. 1. P. 143–150.

15. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Optimizing the Operating Modes of Cogeneration Stations Taking Actual State of Main Equipment into Account // *Thermal Engineering*. 2009. Vol. 56. No. 6. P. 500–505.

16. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. 2-е изд. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. 816 с.

17. Алексеюк В.Э. Усовершенствование методики идентификации математических моделей по резуль-

татам испытаний на примере конденсационной турбоустановки // Системные исследования в энергетике: тр. молодых ученых ИСЭМ СО РАН. Иркутск, 2017. Вып. 47. С. 42–55.

18. Алексеюк В.Э., Максимов А.С. Идентификация математической модели конденсационной турбоустановки по результатам испытаний // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 24–28 апреля 2017 г.). Иркутск, 2017. С. 284–288.

19. Kler A.M., Mai V.A., Skripkin S.K. A system for computer-based creation of static and dynamic mathematical models of thermal power plants, *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International forum, Expert systems and computer simulation in energy engineering* (Erlangen, Germany 17–20 March, 1992). Erlangen, 1992. P. 22.4.1–22.4.3.

## References

1. Levental G.B., Popyrin L.S. *Optimizaciya teploenergeticheskikh ustanovok* [Optimization of thermal power units]. Moscow: Energy Publ., 1970, 352 p. (In Russ.).

2. Popyrin L.S., Samusev V.I., Epelstein V.V. *Avtomatizaciya matematicheskogo modelirovaniya teploenergeticheskikh ustanovok* [Automation of mathematical modeling of heat and power plants]. Moscow: Nauka Publ., 1981, 236 p. (In Russ.).

3. Vulman F.A., Koryagin A.V., Krivoshei M.Z. *Matematicheskoye modelirovaniye teplovykh skhem paroturbinnnykh ustanovok na EVM* [Mathematical modeling of steam turbine heat balance diagrams on digital computers]. Moscow: Machine building Publ., 1985, 112 p. (In Russ.).

4. Palagin A.A. *Avtomatizatsiya proyektirovaniya teplosilovykh skhem turboustanovok* [Design automation of turbine cycle arrangement]. Kiev: Naukova dumka Publ., 1983, 160 p. (In Russ.).

5. Borovikov V.M., Kazarov S.A., Kutakhov A.G., Romanov S.N. Automated design of cycle arrangement and calculation of variable modes of combined cycle gas turbine units at thermal power plants and nuclear power plants. *Teploenergetika*. [Thermal Engineering]. 1993, no. 3, pp. 5–9. (In Russ.).

6. Gamm A.Z., Kolosok I.N. *Obnaruzhenie plokhikh dannykh v telezmereniyakh dlya Avtomatizirovannaya Sistema Dispetcherskogo Upravleniya Elektroenergeticheskoy sistemy na osnove kontrol'nykh uravnenij* [Bad data detection in telemetry for automated dispatch control system of electric power system based on control equations]. Irkutsk: Melentiev Energy Systems Institute SB RAS Publ., 1998, 49 p. (In Russ.).

7. Novitsky N.N. *Ocenivanie parametrov gidravlicheskikh cepej* [Estimation of hydraulic circuit parameters]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1998, 215 p. (In Russ.).

8. Nozdrenko G.V., Ovchinnikov Yu.V. *Optimizaciya vnutristancionnykh rezhimov teploelektrocentrali v sisteme Avtomatizirovannoy sisteme upravleniya tekhnologicheskim processom* [Optimization of CHPP in-plant modes in the automated process control system]. *Zadachi i*

*metody upravleniya elektrostancii: sbornik trudov* [Problems and methods of power plant control: Collected papers]. Novosibirsk, 1982, pp. 21–27. (In Russ.).

9. Krokhin G.D., Suprunenko M.Ya. *Diagnostika sostoyaniya energoustanovok teploelektrostantsij (postanovka eksperimentov)* [Diagnostics of TPP power facility condition (experiment set up)]. *Trudy III Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii "Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya APEP-96"* [Proceedings of the third international scientific and technical conference "Actual problems of electronic instrument engineering APEIE-96", Novosibirsk, September 01 – October 31, 1996]. Novosibirsk, 1996, vol. 5, pp. 105–111. (In Russ.).

10. Dekanova N.P., Kler A.M. *Problemy optimizatsii pri issledovanii teploenergeticheskikh ustanovok* [Optimization problems in the study of thermal power plants]. *Priblizhennyye metody analiza i ih prilozheniya* [Approximate analysis methods and their applications]. Irkutsk: SEI SB AS USSR, 1989, pp. 22–43. (In Russ.).

11. Kler A.M., Dekanova N.P., Mikheev A.V. *Zadachi optimizatsii pri operativnom upravlenii rezhimami raboty teploelektrocentrali* [Optimization tasks at dispatching control of CHP operation modes]. *Tezisy dokladov X Bajkal'skoj shkoly seminara "Metody optimizatsii i ih prilozheniya"* [Abstracts of the 10th Baikal School Workshop "Optimization methods and their uses"]. Irkutsk, 1995, pp. 80–84. (In Russ.).

12. Mikheev A.V. *Ocenivanie sostoyaniya i identifikatsiya parametrov parovogo kotla TP-81 (TEC-9)* [State estimation and parameter identification of the steam boiler TP-81 (CHP-9)]. *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodykh uchenykh ISEM SO RAN* [Systems researches in the energy sector. Works of young scholars of ISEM SB RAS]. Irkutsk, 1999, Issue 29, pp. 143–148. (In Russ.).

13. Dekanova N.P., Mikheev A.V. *Obnaruzhenie plokhikh izmerenij parametrov funkcionirovaniya teploelektrocentrali* [Detection of bad measurements of CHP operation parameters]. *Materialy XI Bajkal'skoj shkoly seminara*



"Metody optimizatsii i ih prilozheniya" [Materials XX of Baikal School Workshop "Optimization methods and their uses"]. Irkutsk, 1998, pp. 79–82. (In Russ.).

14. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L.: High-speed mathematical models of cogeneration steam turbines: optimization of operation in heat and power plants. Thermophysics and Aeromechanics, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 143–150.

15. Kler A.M., Maximov A.S., Stepanova E.L. Optimizing the Operating Modes of Cogeneration Stations Taking Actual State of Main Equipment into Account. Thermal Engineering, 2009, vol. 56, no. 6, pp. 500–505.

16. Kobzar A.I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov* [Applied mathematical statistics for engineers and scientists]. Moscow: FIZMATLIT Publ., 2012, 816 p. (In Russ.).

17. Alexeyuk V.E. *Usovershenstvovanie metodiki identifikatsii matematicheskikh modelej po rezul'tatam ispytaniy na primere kondensatsionnoj turbostanovki* [Improving identification methods of mathematical models based on the test results of a condensing turbine unit]. *Sistemnye issledovaniya v energetike: trudy molodykh uchenykh*

*ISEM SO RAN* [Systems researches in the energy sector. Works of young scholars of Melentiev Energy Systems Institute SB RAS]. Irkutsk, 2017, issue 47, pp. 42–55. (In Russ.).

18. Alexeyuk V.E., Maximov A.S. Alekseyuk V.E., Maksimov A.S. *Identifikatsiya matematicheskoy modeli kondensatsionnoj turbostanovki po rezul'tatam ispytaniy* [Identification of the mathematical model of a condensing turbine unit based on test results]. *Materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem "Povyshenie effektivnosti proizvodstva i ispol'zovaniya energii v usloviyah Sibiri"* [Proceedings of the All-Russian scientific and practical conference with international participation "Improving efficiency of energy production and utilization in Siberian conditions", Irkutsk, 24–27 April 2017]. Irkutsk, 2017, pp. 284–288. (In Russ.).

19. Kler A.M., Mai V.A., Skripkin S.K. A system for computer-based creation of static and dynamic mathematical models of thermal power plants, Proceedings, 2nd International forum, Expert systems and computer simulation in energy engineering (Erlangen, Germany 17–20 March, 1992). Erlangen, 1992, pp. 22.4.1–22.4.3.

#### Критерии авторства

Алексеюк В.Э., Максимов А.С., Сафронов П.Г. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Alekseyuk V.E., Maksimov A.S., Safronov P.G. have equal authors rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

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

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Алексеюк Виталий Эдуардович,

аспирант, инженер отдела теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия, e-mail: alexeyuk.vitaliy@yandex.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Vitaliy E. Alekseyuk,

Post-graduate student, Engineer of the Department of Thermal Power Systems, Melentiev Energy Systems Institute, 130 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: alexeyuk.vitaliy@yandex.ru

##### Максимов Алексей Сергеевич,

кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела теплосиловых систем, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия, e-mail: maxalex301@gmail.com

##### Aleksei S. Maksimov,

Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher of the Department of Thermal Power Systems, Melentiev Energy Systems Institute, 130 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: maxalex301@gmail.com

##### Сафронов Павел Григорьевич,

кандидат технических наук, начальник производственно-технического отдела Харанорской ГРЭС, Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия, e-mail: safronovpg@mail.ru

##### Pavel G. Safronov,

Cand. Sci. (Eng.), Head of the Production and Technical Department of the Kharanor GRES power plant, Melentiev Energy Systems Institute, 130 Lermontov St., Irkutsk, 664033, Russia, e-mail: safronovpg@mail.ru



## Моделирование условий электромагнитной безопасности на железнодорожных станциях

© Н.В. Буякова\*, А.В. Крюков\*\*, А.Д. Степанов\*\*\*

\*Ангарский государственный технический университет, г. Ангарск, Россия

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

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

**Резюме:** Цель – анализ электромагнитного поля, создаваемого тяговой сетью 25 кВ переменного тока на железнодорожных станциях. Применены методы расчетов напряженностей электромагнитного поля и вектора Пойнтинга на основе определения режимов систем тягового электроснабжения в фазных координатах, реализованных в программном комплексе «Fazonord». Расчеты напряженностей электромагнитного поля железнодорожных станций показывают сложность систем тягового электроснабжения из-за большого количества путей и контактных подвесок, наличия металлических вагонов и цистерн, которые могут длительное время находиться на станционных путях. Кроме того, на характер распределения электромагнитного поля влияют металлические трубопроводы и ограждения, а также железобетонные пассажирские платформы. При транзите мощности через контактную сеть станции  $10 + j10$  МВ·А, что близко к пределу нагрузочной способности одного тягового трансформатора мощностью 40000 кВ·А, напряженность магнитного поля на уровне 1,8 м (из-за распределенности токовой нагрузки на контактные сети нескольких путей) существенно меньше напряженности магнитного поля на перегоне. Амплитудные значения напряженности магнитного поля в расчетных примерах не превышают 30 А/м. Наличие подвижного состава значительно снижает плотность потока электромагнитной энергии на пассажирских платформах, а также уровень неблагоприятного воздействия электромагнитного поля на организм человека. Вагоны и цистерны на путях станции приводят к снижению напряженностей электрического и магнитного полей примерно вдвое. Однако наличие подземного трубопровода вблизи станционных путей обуславливает увеличение напряженности магнитного поля в области пространства, расположенного над трубопроводом (из-за существующих на трубопроводе токов). Дополнительно выполнены расчеты изменения поля во времени, обусловленного движением поездов, что позволяет получить наиболее полную картину условий электромагнитной безопасности на железнодорожных станциях.

**Ключевые слова:** железнодорожная станция, система электроснабжения, электромагнитное поле, моделирование

**Информация о статье:** Дата поступления 19 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 22 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Буякова Н.В., Крюков А.В., Степанов А.Д. Моделирование условий электромагнитной безопасности на железнодорожных станциях. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):516–530. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-516-530

## Modeling electromagnetic safety conditions at railway stations

Natalia V. Buyakova, Andrey V. Kryukov, Andrey D. Stepanov

Angarsk State Technical University, Angarsk, Russia

Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

**Abstract:** The purpose of the work is to analyze the electromagnetic field generated by the AC traction network of 25 kV at railway stations. The study applies the calculation methods of electromagnetic field intensity and Poynting vector on the basis of determination of the modes of traction power supply system in phase coordinates implemented in the program complex «Fazonord». The calculations of intensities of railway station electromagnetic field show the complexity of traction power supply systems due to the large number of tracks and catenary lines, lasting presence of metal railway cars and tanks on station tracks. Moreover, the distribution nature of the electromagnetic field is influenced by metal pipelines, fences and reinforced concrete passenger platforms. When the power transited through the contact network of the station is  $10 + j10$  MV·A, which is close to the limiting load capacity of one traction transformer with the capacity of 40000 kV·A, the intensity of the magnetic field at the level of 1.8 m (due to the distribution of the current load on the contact networks of several tracks) is significantly lower than the magnetic field intensity at the haul. The amplitude values of the magnetic

field intensity in calculated examples do not exceed 30 A/m. The presence of rolling stock significantly reduces the density of electromagnetic energy flow on passenger platforms, as well as the level of adverse effects of the electromagnetic field on the human body. Cars and tanks positioned on the tracks of the station cause a 2 times decrease in the intensity of electric and magnetic fields. However, the availability of an underground pipeline near the station tracks causes an increase in the magnetic field intensity in the area above the pipeline (due to the currents existing on the pipeline). The article also provides the calculations of field variation in time determined by the train traffic. This allows to obtain the most complete picture of electromagnetic safety conditions at railway stations.

**Keywords:** railway station, power supply system, electromagnetic field, modeling

**Information about the article:** Received February 19, 2019; accepted for publication March 22, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Buyakova N.V., Kryukov A.V., Stepanov A.D. Modeling electromagnetic safety conditions at railway stations. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):516–530. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-516-530

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Низкочастотные электромагнитные поля (ЭМП), которые создаются высоковольтными линиями электропередачи и тяговыми сетями железных дорог, могут генерировать помехи, вызывающие нарушения нормального функционирования электрических и электронных устройств [1–4], а также приводить к тяжелым несчастным случаям при работе на отключенных линиях электропередачи или связи при воздействии наведенных напряжений на персонал.

На объектах электроэнергетики основные воздействия оказывают электромагнитные поля частотой 50 Гц. Из-за электромагнитной несбалансированности одним из серьезных источников ЭМП являются тяговые сети (ТС) электрифицированных железных дорог переменного тока [4–17]. За счет электромагнитного влияния ТС могут появляться большие напряжения на смежных устройствах. Такие напряжения могут приводить, в свою очередь, к серьезным повреждениям оборудования и смертельным электротравмам. При прохождении трассы железной дороги по территориям населенных пунктов уровни напряженностей ЭМП, создаваемые тяговой сетью, могут в ряде случаев превосходить допустимые нормы [9].

Режимы работы электрифицированной железной дороги отличаются сложной и нелинейной динамикой, что существенно затрудняет получение экспериментальных данных, отвечающих экстремальным уровням напряженности ЭМП [16, 17]. Поэтому для анализа условий электромагнитной без-

опасности (ЭМБ) в системах тягового электроснабжения (СТЭ) используются методы, основанные на компьютерном моделировании [16, 17, 18–22]. Разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения методы моделирования электромагнитных полей многопроводных линий позволили получить количественные оценки напряженностей ЭМП, создаваемые тяговыми сетями. Методика и результаты моделирования для тяговых сетей железнодорожных станций представлены далее.

## 2. ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ МНОГОПУТНЫХ УЧАСТКОВ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЯХ

Задача моделирования условий ЭМБ на железнодорожных станциях имеет особую актуальность, так как на этих объектах возможно длительное пребывание большого количества людей. Распределение электромагнитного поля в пространстве, окружающем ТС железнодорожных станций, имеет усложненный характер из-за большого количества путей и контактных подвесок. Задача моделирования ЭМП на станциях дополнительно затрудняется наличием металлических вагонов и цистерн, которые могут длительное время находиться на станционных путях. Кроме того, на характер распределения ЭМП влияют металлические трубопроводы и ограждения, а также железобетонные пассажирские платформы.

Исследование влияния перечисленных факторов выполнено для достаточно

типичного случая тяговой сети 27,5 кВ типовой железнодорожной станции. Моделирование осуществлялось с помощью программного комплекса «Fazonord» для восьмипутного участка протяженностью в 2 км.

Контактная сеть путей выполнена проводами ПБСМ-95+МФ-100, рельсовая сеть образована рельсами Р-65. Рельсы по обе стороны рассматриваемого участка учтены включением RL-элементов сопротивлениями 0,1 Ом. Суммарные нагрузки тяговой сети, потребляющие токи по 414 А, составляли  $8 + j8$  МВ·А. На рис. 1 представлены координаты контактных проводов, несущих тросов и тяговых рельсов.

Результаты определения напряженностей ЭМП на высоте 1,8 м сведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 2, 3.

Усреднения в табл. 1 сделаны по интервалу оси  $x$  от -30 м до +30 м.

Представленные результаты показывают, что уровни напряженности ЭМП не превосходят допустимого значения в 80 А/м, установленного для эксплуатационного персонала, но могут превышать нормируемые показатели для селитебной территории.

В точке с координатами  $x = 0$ ;  $y = 1,8$  м электрическое и магнитное поля имеют линейную поляризацию, а в точке с координатами  $x = 14$ ;  $y = 1,8$  м поляризация становится эллиптической. Векторы напряженности магнитного поля в точках с координатами  $x$  (отличными от нуля) имеют направление, близкое к вертикальному, при этом наблюдается наибольшая плотность индуцированного в теле человека тока.



Рис. 1. Координаты расположения проводов и рельсов  
Fig. 1. Coordinates of wires and rails arrangement

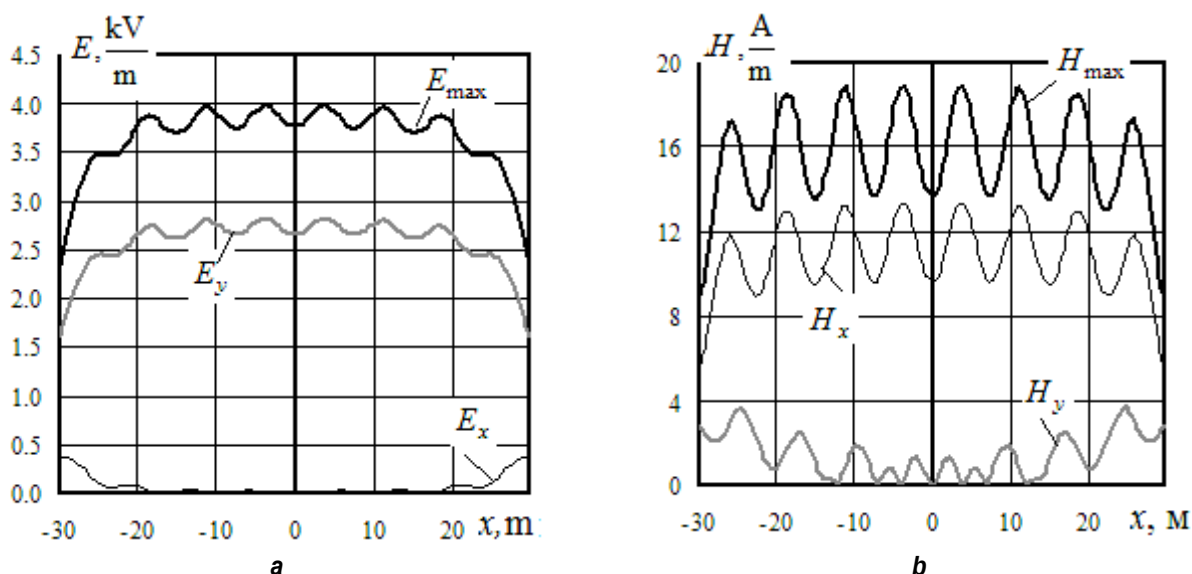


Рис. 2. Напряженности электромагнитных полей на высоте 1,8 м:  
а – электрическое поле; б – магнитное поле

Fig. 2. Intensities of electromagnetic fields at the height of 1.8 m: a – electric field; b – magnetic field

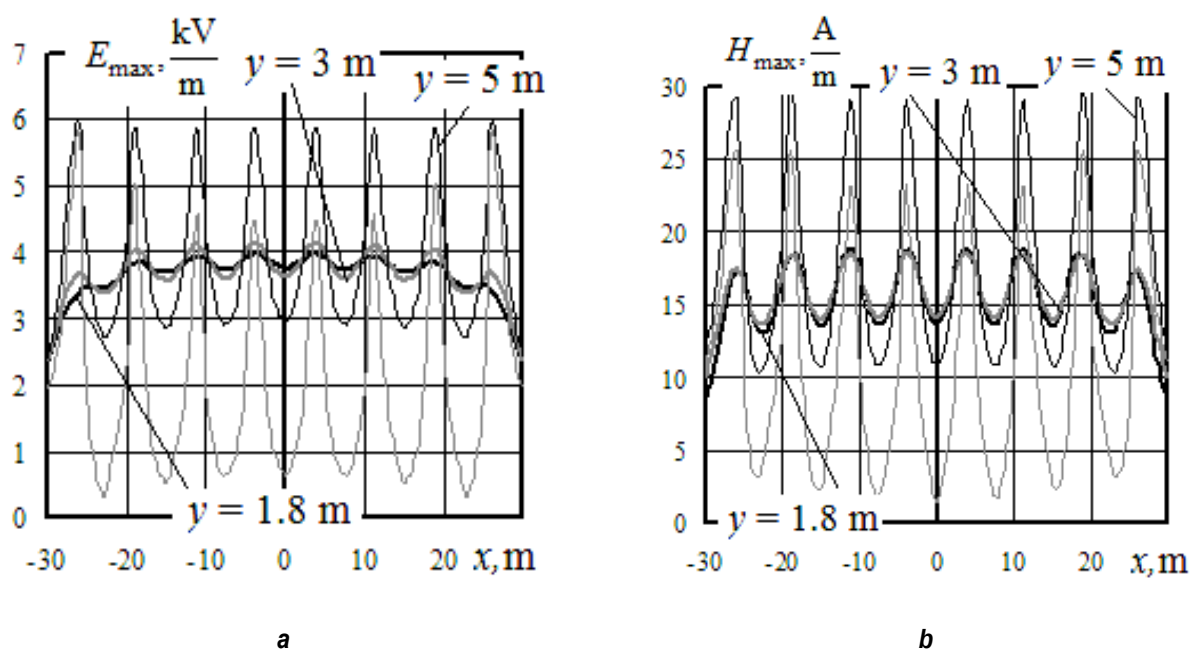


Рис. 3. Амплитуды напряженностей электромагнитных полей на разных высотах:  
а – электрическое поле; б – магнитное поле

Fig. 3. Amplitudes of electromagnetic field intensities at different heights: a – electric field; b – magnetic field

**Электромагнитное поле при движении поездов.** Представленные выше графики напряженностей  $E = E(x)$  и  $H = H(x)$  позволяют получить адекватную картину условий, характеризующих электромагнитную безопасность на железнодорожной станции в конкретном режиме ТС. Однако электромагнитная обстановка на железнодорожных станциях непрерывно меняется ввиду резкопеременного характера тяговой нагрузки. Этот фактор снижает информативность расчетов ЭМП, выполненных для конкретных значений токов и напряжений в ТС. Путем получения динамики изменения ЭМП при моделировании реальных графиков движения поездов можно преодолеть указанное затруднение.

В качестве примера ниже представлены результаты расчета динамики напряженностей магнитных полей при движении поездов. Координаты токоведущих частей, отличающиеся от приведенных на рис. 1 более плотным расположением путей, представлены на рис. 4 а. График движения поездов показан на рис. 4 б.

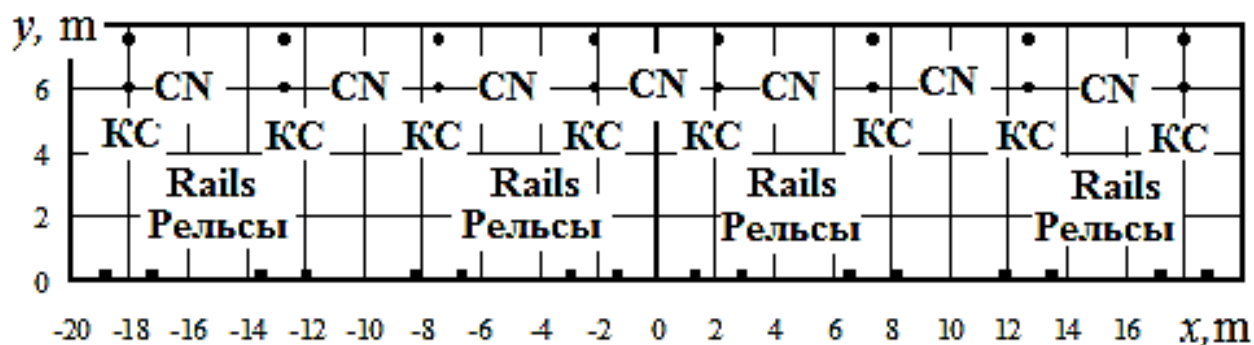
Рассматриваемый участок дороги включал в свой состав перегон и восемь

станционных путей нечетного и четного направлений. Потоки мощности по тяговой сети распределяются с перегона на параллельно соединенные контактные подвески станции, что должно приводить к снижению магнитного поля.

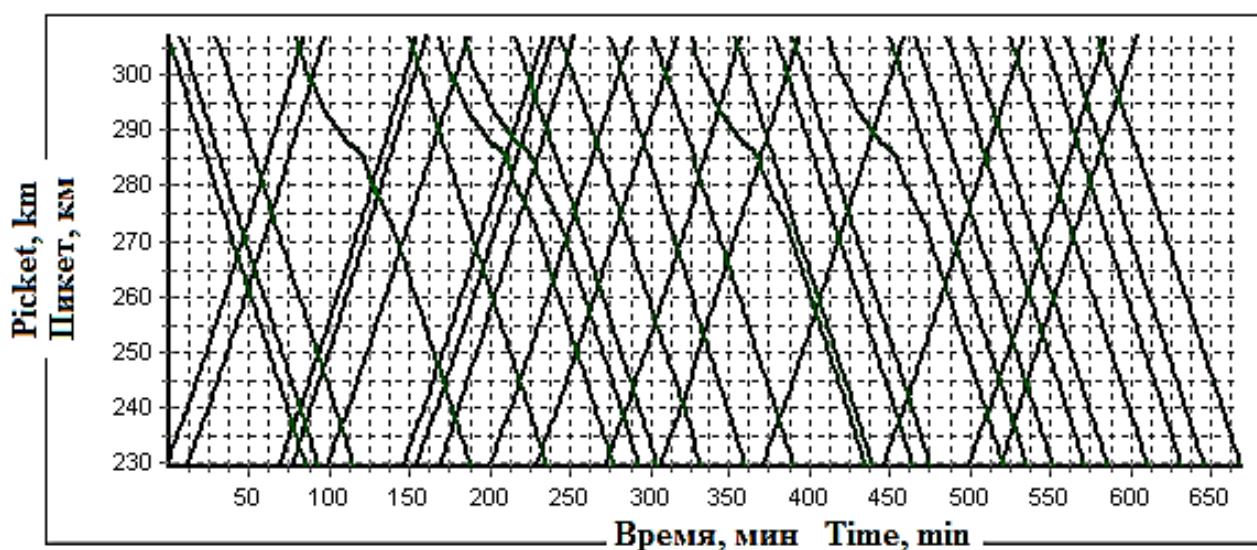
Сводные результаты моделирования работы системы при движении поездов для левой стороны многопутного участка приведены в табл. 1 и проиллюстрированы на рис. 5.

Полученные результаты подтверждают вывод о том, что напряженности ЭМП не превосходят предельно допустимых уровней (ПДУ) для эксплуатационного персонала, но могут превышать ПДУ для объектов, на которых возможно длительное пребывание большого количества людей.

Путем моделирования режимов СТЭ для реальных графиков движения поездов можно получить адекватную картину условий электромагнитной безопасности на пассажирских и грузовых станциях магистральных железных дорог. На результатах такого моделирования может базироваться разработка мероприятий по повышению уровня ЭМБ.



a



b

Рис. 4. Координаты токоведущих частей (a) и график движения поездов (b)

Fig. 4. Coordinates of current carrying parts (a) and a train schedule (b)

Таблица 1

Статистические показатели составляющих электромагнитных полей  
на высоте 1,8 м за время моделирования

Table 1

Statistical indices of electromagnetic field constituents at the height of 1.8 m  
under simulation

| Параметр | Электрическое поле, кВ/м |       |           | Магнитное поле, А/м |       |           |
|----------|--------------------------|-------|-----------|---------------------|-------|-----------|
|          | $E_x$                    | $E_y$ | $E_{max}$ | $H_x$               | $H_y$ | $H_{max}$ |
| Минимум  | 0,035                    | 2,850 | 4,031     | 0,018               | 0,000 | 0,026     |
| Среднее  | 0,038                    | 3,145 | 4,448     | 3,589               | 0,127 | 5,082     |
| Максимум | 0,039                    | 3,228 | 4,565     | 23,340              | 1,375 | 33,027    |
| $\sigma$ | 0,001                    | 0,078 | 0,110     | 4,468               | 0,197 | 6,319     |

Примечание:  $\sigma$  – среднеквадратичное отклонение / Note:  $\sigma$  – standard deviation

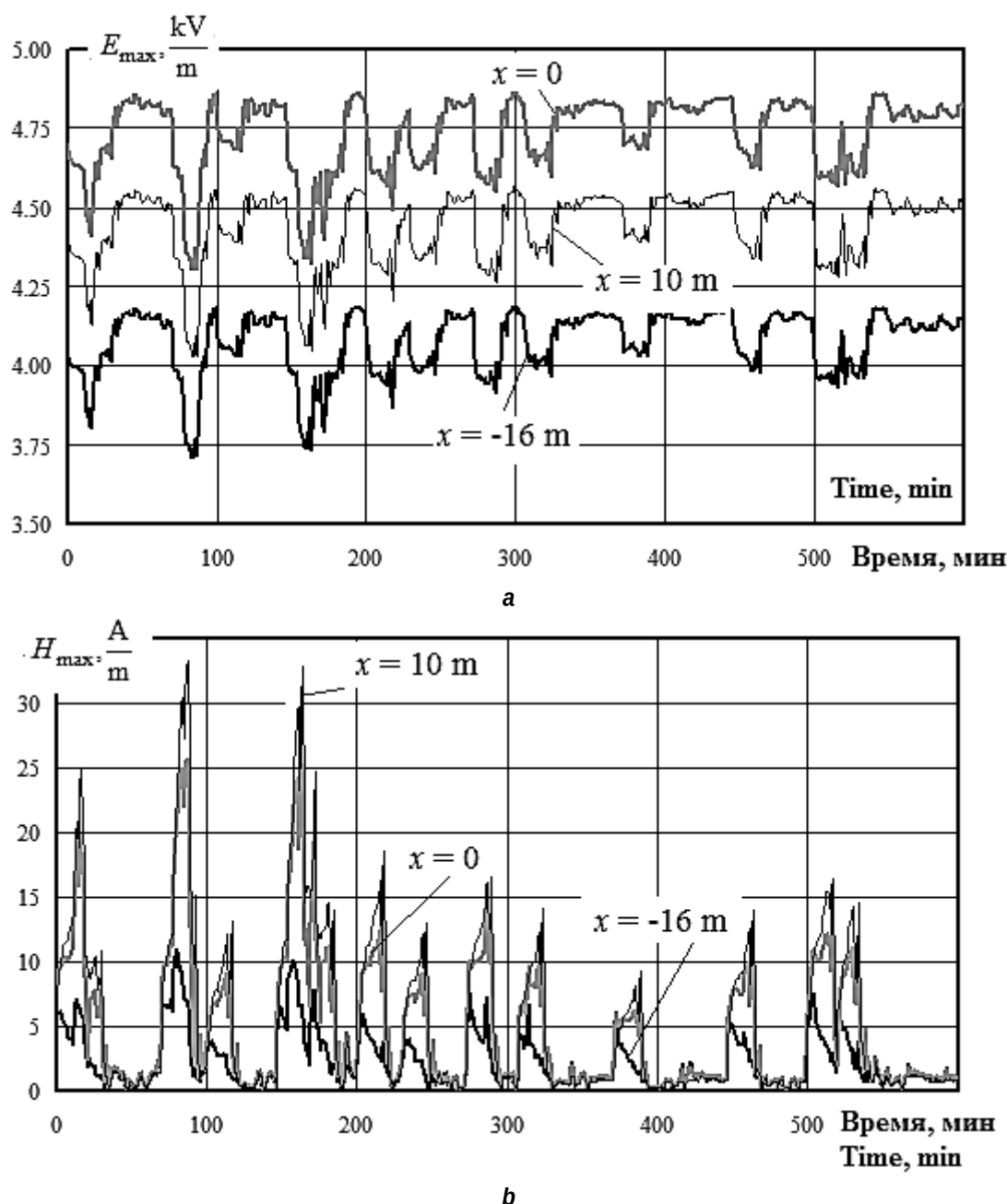


Рис. 5. Зависимости от времени амплитуд напряженностей электромагнитных полей на высоте 1,8 м для разных значений координаты  $x$ : а – электрическое поле; б – магнитное поле  
 Fig. 5. Time dependences of amplitudes of electromagnetic field intensities at the height of 1.8 m for different values of coordinate  $x$ : а – electric field; б – magnetic field

### 3. УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

Металлические вагоны и цистерны, которые постоянно находятся на запасных путях крупных железнодорожных станций, могут существенно изменять картину распределения напряженности магнитного поля. Предлагаемая компьютерная технология позволяет моделировать подвижной

состав наборами заземленных проводов. При формировании этих наборов должны выполняться следующие условия:

$$d_{ij} \ll D_{ik} \text{ и } d_{ij} \ll D_{jk},$$

где  $d_{ij}$  – расстояние между парой соседних проводов;  $D_{ik}$ ,  $D_{jk}$  – соответственно, расстояние от проводов  $i, j$  до точки наблюдения.

Для иллюстрации возможностей моделирования выбрана достаточно типичная ситуация железнодорожной станции с восемью электрифицированными путями, разрез тяговой сети которой показан на рис. 6. На путях станции расположены вагоны и цистерны. Рельсовые нити при расчетах учитывались как отдельные заземленные проводники.

При моделировании режимов и расчете напряженностей ЭМП использовались следующие параметры:

- протяженность восьмипутного участка тяговой сети 2 км;
- две нагрузки по  $10 + j10$  МВ·А приложены в конце участка с параллельно соединенными контактными подвесками относительно нечетного и четного направлений.

Результаты, полученные при моделировании в программном комплексе «Fazonord», представлены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 7 графиками зависимостей амплитуд напряженностей ЭМП от координаты  $x$ .

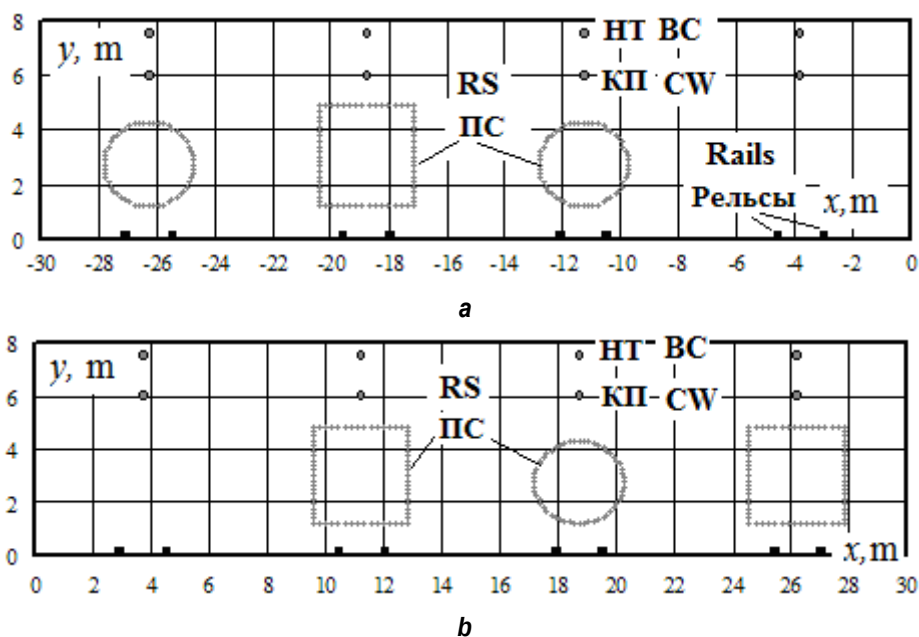


Рис. 6. Координаты проводов многопроводной системы при наличии подвижного состава:  
а – нечетный парк; б – четный парк

Fig. 6. Coordinates of wires of a multi-wire system in the presence of the rolling stock:  
a – odd park; b – even park

Таблица 2

Максимальные и средние значения напряженностей электромагнитных полей на высоте 1,8 м в диапазоне изменения координаты  $x$  от -30 м до +30 м

Table 2

Maximum and mean values of electromagnetic field intensities at the height of 1.8 m in coordinate  $x$  range from -30 m to +30 m

| Параметр | Величина                                     | Отсутствие вагонов и цистерн | Наличие вагонов и цистерн | Различие, % |
|----------|----------------------------------------------|------------------------------|---------------------------|-------------|
| Среднее  | $E_{\text{MAX}}, \frac{\text{кВ}}{\text{м}}$ | 3,63                         | 1,78                      | 51,0        |
| Максимум |                                              | 3,99                         | 3,51                      | 11,8        |
| Среднее  | $H_{\text{MAX}}, \frac{\text{А}}{\text{м}}$  | 15,4                         | 6,43                      | 58,2        |
| Максимум |                                              | 18,8                         | 13,0                      | 31,1        |

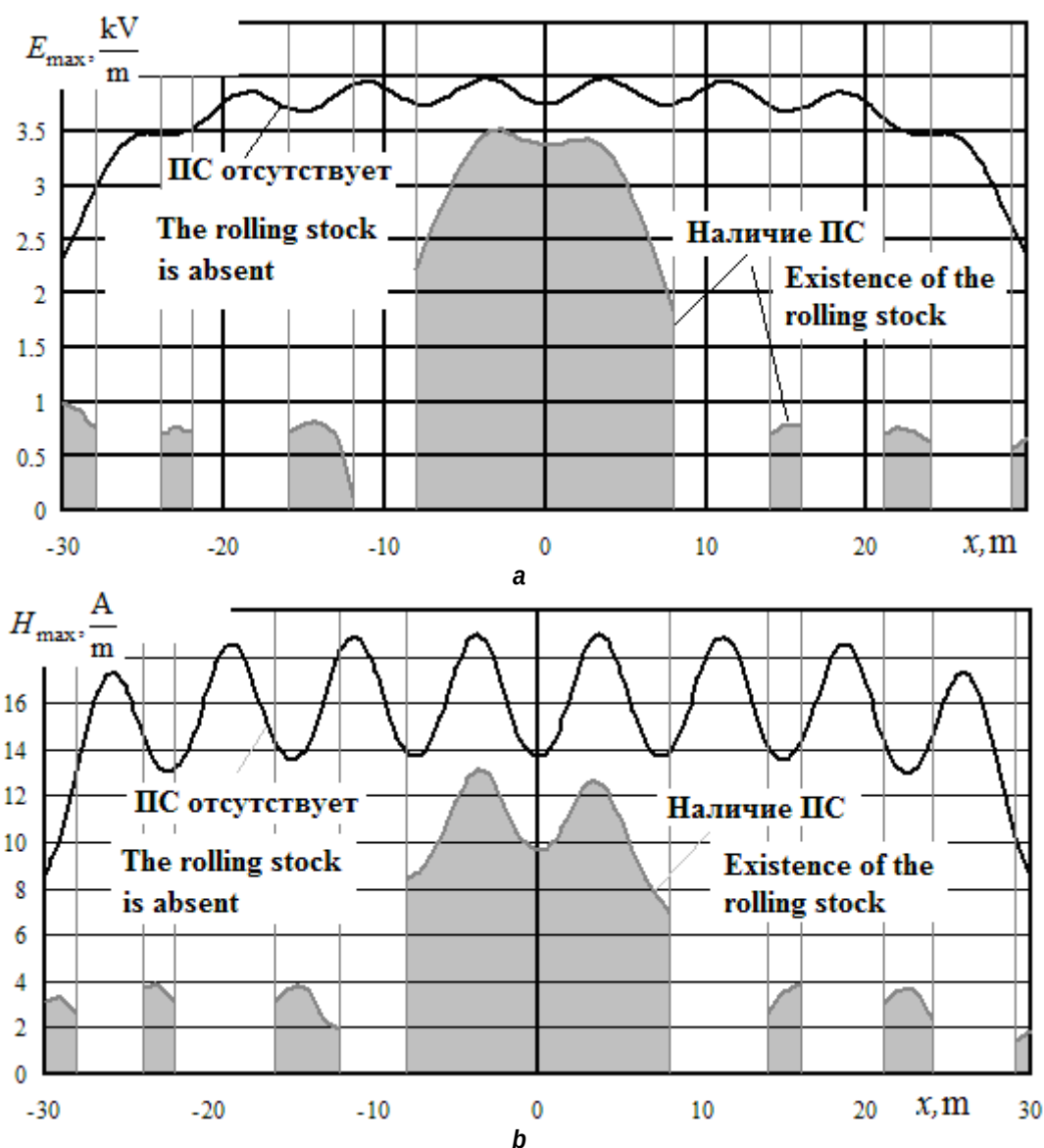


Рис. 7. Амплитуды напряженности электромагнитных полей на высоте 1,8 м:  
 а – электрическое поле; б – магнитное поле  
 Fig. 7. Amplitudes of electromagnetic field intensities at the height of 1.8 m:  
 а – electric field; б – magnetic field

Результаты моделирования дают возможность сформулировать следующие выводы.

1. Тяговая сеть (включающая восемь контактных подвесок и 16 рельсовых нитей) создает напряженности электрического и магнитного полей, не превосходящие допустимые уровни, которые установлены для эксплуатационного персонала. Однако эти величины могут превышать предельные значения для территорий жилой застройки.

2. Результаты моделирования показали, что при наличии вагонов и цистерн на путях станции экстремальные значения

напряженностей электрического поля снижаются на 50%, а магнитного – на 58%. По средним значениям различия, соответственно, равны 11 и 31%.

Таким образом, компьютерная технология моделирования электромагнитных полей позволяет учитывать влияние металлических вагонов и цистерн, расположенных на станциях.

#### 4. УЧЕТ ПАССАЖИРСКИХ ПЛАТФОРМ

Одним из существенных факторов (способных приводить к заметному повыше-

нию напряженностей электрического и магнитного полей) является наличие пассажирских платформ с протяженными и заземленными металлическими деталями. Для выявления закономерностей электромагнитной обстановки на таких станциях выполнено моделирование восьмипутной тяговой сети 27,5 кВ. Координаты расположения контактных проводов, несущих тросов, рельсов, а

также железобетонных пассажирских платформ указаны на рис. 8.

Напряжение контактной сети принято равным 27,5 кВ, транзит мощности за пределы станционной контактной сети по двум путям перегона составляет  $10 + j10$  МВ·А по каждому пути. Результаты моделирования показаны на рис. 9.

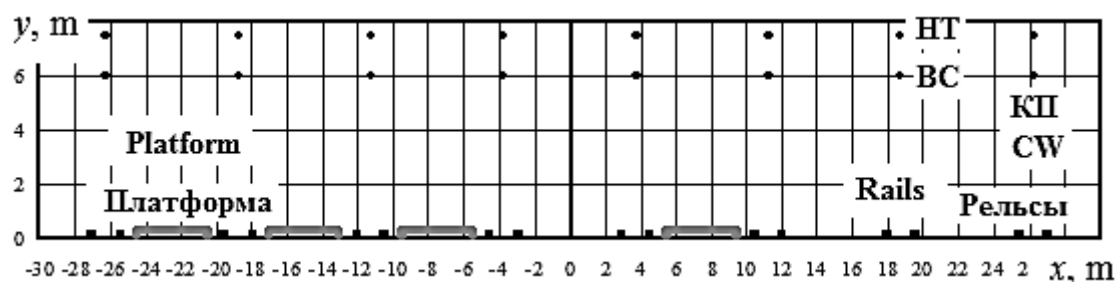


Рис. 8. Координаты расположения проводников  
Fig. 8. Coordinates of conductor arrangement

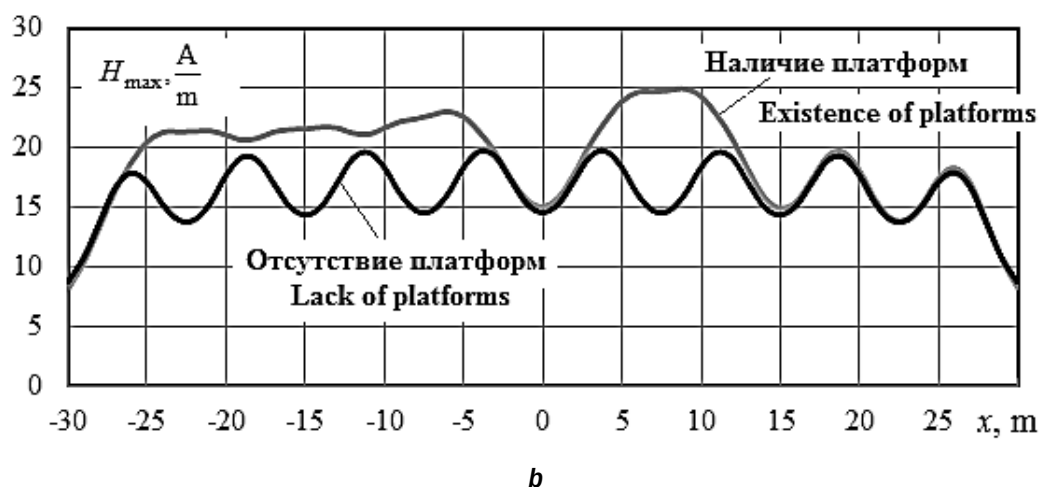
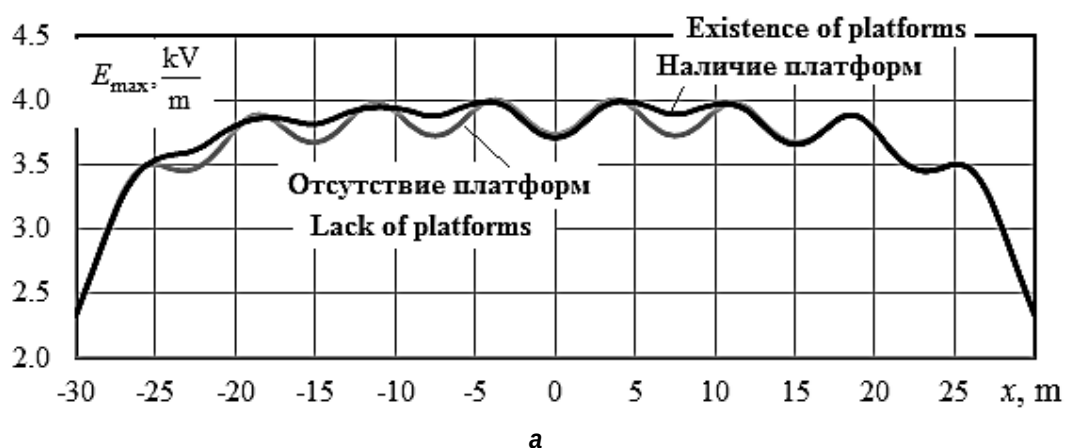


Рис. 9. Зависимости от координаты  $x$  амплитуд напряженности  
электромагнитных полей на высоте 2,1 м

Fig. 9. Dependences of electromagnetic field intensity amplitudes at the height of 2.1 m on coordinate  $x$

Из приведенных зависимостей видно, что пассажирские платформы практически не влияют на напряженность электрического поля, но на 15...25% увеличивают напряженность магнитного поля в районе расположения платформ на высоте 2,1 м от поверхности земли.

## 5. УЧЕТ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Разработанная методика позволяет учитывать такой важный фактор, влияющий на уровень ЭМП, как наличие заземленных и протяженных металлических объектов. К ним можно отнести трубопроводы наземной и подземной прокладки, кабельные линии с проводящими оболочками, конструкции, ограждающие территорию объектов, расположенных на железнодорожной станции. Анализ влияния этого фактора проведен путем моделирования тяговой сети 27,5 кВ железнодорожной станции. Координаты распо-

ложения токоведущих частей и трубопровода, проложенного параллельно трассе железной дороги, приведены на рис. 10.

Предполагалось, что с правой стороны путей (см. рис. 10) проложен трубопровод, выполненный из стальных труб диаметром 300 мм с проводимостью к растеканию, равному 0,5 См/км. Из-за магнитного влияния тяговой сети по трубам могут протекать большие наведенные токи. Расчеты выполнены при нагрузках тяговой сети равных  $10 + j10$  МВ·А.

Рассматривалось три варианта конструкций трубопровода, проложенного на глубине в 1 м: однетрубная, двутрубная и трехтрубная. Дополнительно предлагался вариант отсутствия трубопровода.

Результаты расчета напряженностей магнитного поля на высоте 1,8 м для указанных вариантов при изменении координаты  $x$  от 31 м до 40 м и расположении труб вблизи координаты  $x = 34$  м приведены на рис. 11.

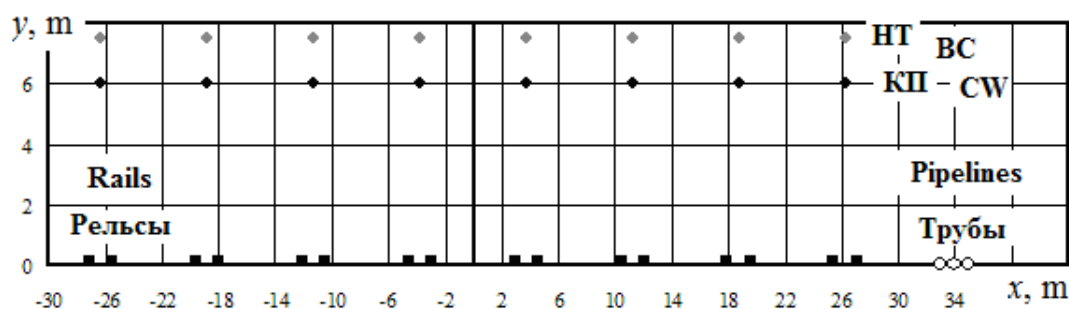


Рис. 10. Координаты расположения проводов, рельсов и трубопровода  
Fig. 10. Coordinates of wires, rails and a pipeline

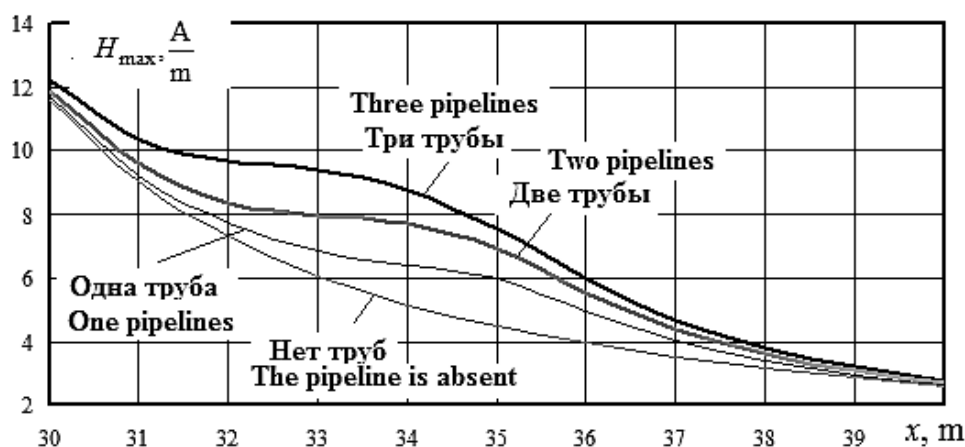


Рис. 11. Магнитное поле вблизи трубопровода  
Fig. 11. Magnetic field close to a pipeline



Результаты расчетов показывают, что величины амплитуд напряженности магнитного поля вблизи труб увеличены вплоть до полуторакратного значения по сравнению с

ситуацией при их отсутствии. Происходит это за счет токов, наведенных в заземленной металлической конструкции трубопровода магнитным полем контактной сети.

Таблица 3

**Напряженности магнитного поля на высоте 1,8 м в диапазоне координаты  $x$  от 24 м до 34 м**

Table 3

**Magnetic field intensities at the height of 1.8 m in the range of coordinate  $x$  from 24 m to 34 m**

| Параметр         | $H_{\max}$ , A/m   |                       | Различие, % |
|------------------|--------------------|-----------------------|-------------|
|                  | Наличие ограждения | Отсутствие ограждения |             |
| Среднее значение | 12,82              | 11,29                 | 11,9        |
| Максимум         | 17,32              | 18,20                 | -5,1        |

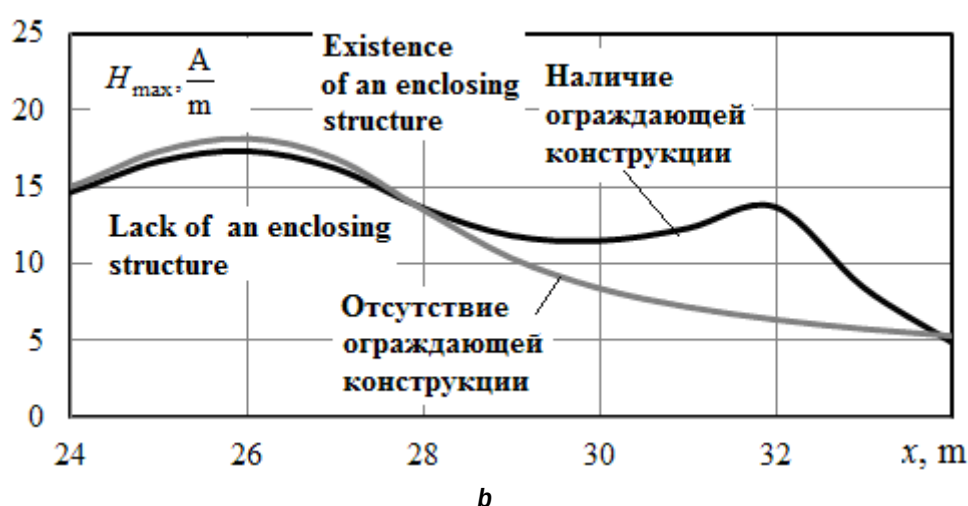
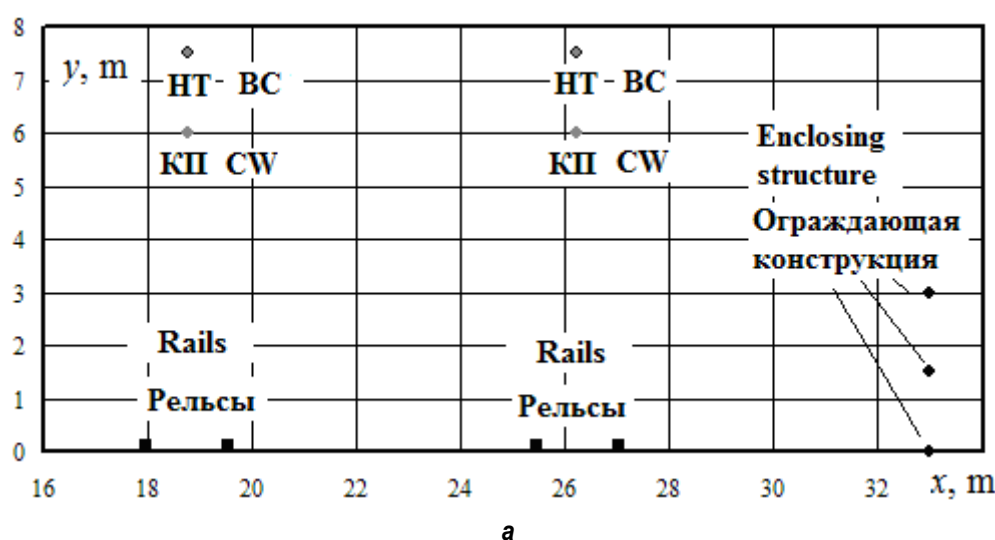


Рис. 12. Координаты токоведущих частей (а) и зависимости амплитуд напряженности магнитного поля от координаты  $x$

Fig. 12. Coordinates of current carrying parts (a) and dependences of magnetic field intensity amplitudes on coordinate  $x$

Таким образом, при анализе электромагнитной обстановки на объектах железнодорожного транспорта необходимо учитывать подземные металлические трубопроводы, проложенные вдоль трассы железной дороги. За счет их влияния возможно превышение ПДУ в локальных областях пространства. Такая ситуация часто имеет место на железнодорожных станциях и при прохождении железной дороги в пределах населенных пунктов.

## **6. УЧЕТ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ**

Территория железнодорожной станции может иметь металлические ограждения, которые могут влиять на характер распределения ЭМП в пространстве.

Координаты проводов при типичном расположении заземленных металлических ограждений на восьмипутном участке показаны на рис. 12 а. Результаты расчета напряженности магнитного поля с учетом влияния ограждающих конструкций при транзите мощности  $10 + j10$  МВ·А по двум путям вне станции представлены в табл. 3 и на рис. 12 б.

Наличие ограждений приводит к повышению средней напряженности магнитного поля вблизи ограждения с некоторым снижением максимума, однако на расстоянии порядка 2 м от ограждения наблюдается значительное повышение напряженности, обеспечивающее увеличение среднего значения.

## **7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Распределение электромагнитного поля в пространстве, окружающем тяговые сети железнодорожных станций, имеет усложненный характер из-за большого количества путей и контактных подвесок. Задача моделирования электромагнитных полей на станциях дополнительно за-

трудняется наличием металлических вагонов и цистерн, которые могут длительное время находиться на станционных путях. Кроме того, на характер распределения полей влияют металлические трубопроводы и ограждения, а также железобетонные пассажирские платформы.

2. При транзите мощности через контактную сеть станции  $10 + j10$  МВ·А, что близко к пределу нагрузочной способности одного тягового трансформатора мощностью 40000 кВ·А, напряженность магнитного поля на уровне 1,8 м (из-за распределенности токовой нагрузки на контактные сети нескольких путей) существенно меньше напряженности магнитного поля на перегоне. Уровни напряженности магнитного поля в расчетных примерах не превышают 30 А/м амплитудных.

3. Путем моделирования режимов системы тягового электроснабжения для реальных графиков движения поездов можно получить адекватную картину условий электромагнитной безопасности на пассажирских и грузовых станциях магистральных железных дорог. На результатах такого моделирования может базироваться разработка мероприятий по повышению уровня электромагнитной безопасности.

4. Результаты моделирования показали, что при наличии вагонов и цистерн на путях станции экстремальные значения напряженностей электрического поля снижаются на 50%, а магнитного – на 58%. По средним значениям различия, соответственно, равны 11 и 31%.

5. За счет наведения токов в заземленной металлической конструкции трубопровода имеет место рост напряженности поля в области пространства, расположенного над трубопроводом. Наличие металлических ограждений станционных путей приводит к повышению напряженности магнитного поля вблизи них.

### **Библиографический список**

1. Аполлонский С.М. Проблемы электромагнитной безопасности на электрифицированной железной дороге: в 2 т. Электромагнитная безопасность на железной дороге с переменным током в тяговой сети.

Т. II. М.: РУСАЙНС, 2017. 414 с.

2. Сидоров А.И., Украинская И.С. Электромагнитные поля вблизи электроустановок сверхвысокого напряжения. Челябинск: ЮУрГУ, 2008. 204 с.



3. Тихонов М.Н. Механизм влияния естественных и техногенных электромагнитных полей на безопасность жизнедеятельности // Экология промышленного производства. 2011. № 4. С. 24–32.
4. Кузнецов К.Б., Закирова А.Р., Матафонов А.А. Электромагнитная безопасность процесса перевозок на электрифицированном транспорте // Транспортный комплекс в регионах: опыт и перспективы организации движения: материалы Междунар. науч.-практ. конф. (г. Воронеж, 28 мая 2015 г.). Воронеж, 2015. С. 187–192.
5. Белинский С.О. Электромагнитная безопасность персонала электроустановок железнодорожного транспорта // Транспорт-2014: материалы Междунар. науч.-практ. конф.: в 4-х ч. [г. Ростов-на-Дону, 22–25 апреля 2014 г.]. Ростов-на-Дону, 2014. Ч. IV. С. 16–18.
6. Кусмарцева Е.В., Якубович Д.М. Влияние современных источников электромагнитных полей на безопасность человека в техносфере // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях: материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. (г. Саратов, 18–20 мая 2016 г.). Саратов, 2016. С. 46–48.
7. Махутов Н.А., Калмыков В.М., Балановский В.Л., Балановский Л.В. Качество жизни и электромагнитная безопасность // Качество и жизнь. 2014. № 2(2). С. 53–57.
8. Ogunsola A., Mariscotti A. Electromagnetic Compatibility in Railways. London: Springer, 2013. 529 p.
9. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM // International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09 (Kyoto, June 2009). Kyoto, 2009. P. 567–570.
10. Frey S. Railway Electrification Systems & Engineering. White Word Publications. Delhi, 2012. 145 p.
11. Biesenack H., Braun E., George G. Energieversorgung elektrischer bannen. Wiesbaden: B.G. Teubner

Verlag, 2006. 732 p.

12. Steimel A. Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008, 334 p.
13. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. М.: УМК МПС, 2002. 638 с.
14. Буюкова Н.В., Закарюкин В.П., Крюков А.В. Электромагнитная безопасность в системах электроснабжения железных дорог: моделирование и управление. Ангарск: РИО АНГТУ, 2018. 382 с.
15. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2005. 273 с.
16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. Power Technology and Engineering, 2015. Vol. 49. No. 4. P. 304–309.
17. 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.
18. Buyakova N., Zaharukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems // Advances in Intelligent Systems Research. Vth International workshop Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security. IWCI, 2018. Vol. 158. P. 20–25.
19. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A., Tu Nguyen. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems // E3S, Web of Conferences 58, 01006(2018) RSES. 2018. P. 1–6.
20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures // Advances in Engineering Research. International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport. AviaENT, 2018. Vol. 158. P. 219–225.

## References

1. Apollonskij S.M. *Problemy elektromagnitnoj bezopasnosti na elektrificirovannoj zheleznoj doroge. Elektromagnitnaya bezopasnost' na zheleznoj doroge s peremennym tokom v tyagovoj seti* [Electrified railway electromagnetic safety problems. Electromagnetic safety on an AC railway in the traction network]. Moscow: RUSAJNS Publ., 2017, 414 p. (In Russ.).
2. Sidorov A.I., Okrainskaya I.S. *Elektromagnitnye polya vblizi elektro-ustanovok sverhvyssokogo napryazheniya* [Electromagnetic fields near ultra-high voltage electrical installations]. Chelyabinsk: South Ural state University Publ., 2008, 204 p. (In Russ.).
3. Tihonov M.N. *Mekhanizm vliyaniya estestvennyh i tekhnogennyh elektromag-nitnyh polej na bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti* [Influence mechanism of the natural and technogenic electromagnetic fields on life safety]. *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Industrial Ecology], 2011, no. 4, pp. 24–32. (In Russ.).

4. Kuznecov K.B., Zakirova A.R., Matafonov A.A. *Elektromagnitnaya bezopasnost' processa perevozok na elektrificirovannom transporte* [Electromagnetic safety of transportation by electrified transport]. *Materialy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Transportnyj kompleks v regionah: opyt i perspektivy organizacii dvizheniya"* [Proceedings of the International scientific and practical conference "Transport complex in the regions: traffic organization experience and prospects", Voronezh, 28 May 2015]. Voronezh, 2015, pp. 187–192. (In Russ.).
5. Belinskij S.O. *Elektromagnitnaya bezopasnost' personala elektroustanovok zheleznodorozhnogo transporta* [Electromagnetic safety of the personnel of railway transport electrical installations]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. 2014 "Transport-2014"* [Materials of the International scientific and practical Conference, Transport-2014, Rostov-na-Donu,

22–25 April 2014]. Rostov-na-Donu, 2014, part. IV, pp. 16–18. (In Russ.).

6. Kusmarceva E.V., Yakubovich D.M. *Vliyanie sovremennykh istochnikov elektro-magnitnykh polej na bezopasnost' cheloveka v tekhnosfere* [The effect of modern sources of electromagnetic fields on human safety in technosphere]. *Materialy IV Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Innovacii v prirodoobustroystve i zashchite v chrezvychajnykh situatsiyah"* [Proceedings of IV International scientific and practical Conference "Innovations in environmental management and protection in emergency situations" Saratov, 18–20 May 2016]. Saratov, 2016, pp. 46–48. (In Russ.).

7. Mahutov N.A., Kalmykov V.M., Balanovskij V.L., Balanovskij L.V. Quality of life and electromagnetic safety. *Kachestvo i zhizn'* [Quality and Life], 2014, no. 2(2), pp. 53–57. (In Russ.).

8. Ogunsola A., Mariscotti A. *Electromagnetic Compatibility in Railways*. London: Springer, 2013, 529 p.

9. Ogunsola A., Reggiani U., Sandrolini L. Modelling Electromagnetic Fields Propagated from an AC Electrified Railway Using TLM. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC'09* [Kyoto, June 2009]. Kyoto, 2009, pp. 567–570.

10. Frey S. *Railway Electrification Systems & Engineering*. White Word Publications. Delhi, 2012, 145 p.

11. Biesenack H., Braun E., George G. *Energieversorgung elektrischer bannen*. Wies-baden: B.G. Teubner Verlag, 2006, 732 p.

12. Steimel A. *Electric traction motive power and energy supply. Basics and practical experience*. Munchen: Oldenbourg Industrieverlag, 2008, 334 p.

13. Bader M.P. *Elektromagnitnaya sovместimost'* [Electromagnetic Compatibility]. Moscow: UMK MPS, 2002, 638 p. (In Russ.).

#### **Критерии авторства**

Буякова Н.В. выполнила компьютерное моделирование электромагнитных полей. Крюков А.В. предложил методику моделирования, проанализировал полученные результаты, подготовил текст статьи. Степанов А.Д. выполнил математическую обработку результатов моделирования. Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Буякова Наталья Васильевна**,  
кандидат технических наук, доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий, Ангарский государственный технический университет, 665835, г. Ангарск, ул. Чайковского, 60, Россия, e-mail: bn\_900@mail.ru

14. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Elektromagnitnaya bezopasnost' v sistemah elektrosnabzheniya zheleznnykh dorog: modelirovaniye i upravleniye* [Electromagnetic safety in power supply systems of railways: modeling and control]. Angarsk: RIO Angara State Technical University, 2018, 382 p. (In Russ.).

15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. *Slozhnonnesimmetrichnye rezhimy elektricheskikh si-stem* [Complex non-symmetric modes of electrical systems]. Irkutsk: Irkutsk State University Publ., 2005, 273 p. (In Russ.).

16. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Determination of the induced voltages when nonparallel power lines are adjacent to one another. *Power Technology and Engineering*, 2015, vol. 49. no. 4, pp. 304–309.

17. 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.

18. Buyakova N., Zaharukin V., Kryukov A. Imitative Modelling of Electromagnetic Safety Conditions in Smart Power Supply Systems. *Advances in Intelligent Systems Re-search. Vth International workshop "Critical infrastructures: contingency management, intelligent, agent-based, cloud computing and cyber security"*. IWCI, 2018, vol. 158, pp. 20–25.

19. Buyakova N., Zakaryukin V., Kryukov A., Tu Nguyen. Electromagnetic Safety Enhancing in Railway Electric Supply Systems. *E3S, Web of Conferences* 58, 01006(2018) RSES, 2018, pp. 1–6.

20. Buyakova N.V., Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Modeling of electrical fields in railway engineering structures. *Advances in Engineering Research. International Conference on Aviaemechanical Engineering and Transport. AviaENT*, 2018, vol. 158, pp. 219–225.

#### **Authorship criteria**

Buyakova N.V. performed computer simulation of electromagnetic fields. Kryukov A.V. proposed a simulation method, analyzed the obtained results, prepared the manuscript. Stepanov A.D. performed mathematical processing of simulation results. The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Natalia V. Buyakova**,  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Power Supply of Industrial Enterprises, Angarsk State Technical University, 60 Chaikovsky St., Angarsk 665835, Russia, e-mail: bn\_900@mail.ru



**Крюков Андрей Васильевич,**

доктор технических наук,  
академик Российской академии транспорта,  
член-корр. АН ВШ РФ и Российской  
инженерной академии,  
заслуженный энергетик Республики Бурятия,  
профессор кафедры электроэнергетики транспорта,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия;  
профессор кафедры электроснабжения  
и электротехники,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Степанов Андрей Дмитриевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры электроэнергетики транспорта,  
Иркутский государственный университет  
путей сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия,  
e-mail: stepanov\_andrey\_1978@mail.ru

**Andrey V. Kryukov,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Academician of the Russian Academy of Transport,  
Corresponding Member of the Academy of Sciences  
of Higher School of the Russian Federation  
and Russian Engineering Academy,  
Honored Power Engineer of the Buryat Republic,  
Professor of the Department  
of Transport Electrical Engineering of ISTU,  
Professor of the Department of Power Supply  
and Electrical Engineering of INRTU,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: and\_kryukov@mail.ru

**Andrey D. Stepanov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Transport Electrical Engineering,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: stepanov\_andrey\_1978@mail.ru



## Анализ способов и технических средств систем ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов постоянного и переменного токов

© Т.В. Волчек, О.В. Мельниченко, С.Г. Шрамко, А.О. Линьков

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

**Резюме:** Целью данной статьи является исследование различных способов реализации системы ослабления поля тяговых электродвигателей электровозов постоянного и переменного токов, выявление достоинств и недостатков. На их основании разработана и предложена система ослабления поля тяговых электродвигателей электровоза переменного тока с энергосберегающим способом управления, выполненная на базе IGBT-транзисторов. Применен метод сравнительного анализа устройств, принципов работы, а также достоинств и недостатков различных способов реализации систем ослабления поля тяговых электродвигателей электровозов постоянного и переменного тока. Рассмотрев существующие системы ослабления поля тяговых электродвигателей электровозов постоянного и переменного тока, были выявлены все их недостатки. Проанализировав современные научные труды ученых и специалистов, посвященные совершенствованию системы ослабления поля тяговых электродвигателей, можно сделать вывод, что все работы направлены на то, чтобы исключить индуктивный шунт из силовой цепи, обеспечивая надежную защиту при нестационарных режимах работы электровоза. На основании проведенного анализа недостатков различных способов реализации систем ослабления поля тяговых электродвигателей предложена усовершенствованная система, позволяющая заменить индуктивный шунт на IGBT-транзистор с энергосберегающим алгоритмом управления, способная обеспечивать надежную защиту при нестационарных режимах работы электровоза.

**Ключевые слова:** система ослабления поля тяговых электродвигателей, электровозы переменного и постоянного токов, индуктивный шунт, резистор ослабления поля, силовые полупроводниковые элементы, энергосберегающий способ управления

**Информация о статье:** Дата поступления 4 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 14 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Волчек Т.В., Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О. Анализ способов и технических средств систем ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов постоянного и переменного тока. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):531–542. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-531-542

## Analysis of methods and technical equipment of traction motor field attenuation systems for AC and DC electric locomotives

Tatiana V. Volchek, Oleg V. Melnichenko, Sergey G. Shramko, Aleksei O. Linkov

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of this article is the study of various implementation methods of the field attenuation system of traction motors of DC and AC electric locomotives as well as identification of their advantages and disadvantages. Taking into account the discussed methods a field attenuation system of traction motors of DC and AC electric locomotives with an energy-saving control method designed on the basis of IGBT-transistors has been developed and proposed. The study uses the method of comparative analysis of devices, operation principles, advantages and disadvantages of various implementation methods of the field attenuation systems of traction motors of DC and AC electric locomotives. Consideration of the existing field attenuation systems of traction motors of DC and AC electric locomotives allowed to reveal all their shortcomings. The analysis of the modern scientific works of scientists and specialists devoted to the improvement of the field attenuation system of traction electric motors resulted in the conclusion that all the works are aimed at eliminating the inductive shunt from the power circuit providing reliable protection in non-stationary operation modes of the electric locomotive. Having considered the shortcomings of various implementation methods of the field attenuation systems of traction motors, an improved system has been proposed that allows to replace the inductive shunt with an IGBT-transistor with an energy-saving control algorithm. The system is able to provide reliable protection in non-stationary operation modes of the electric locomotive.

**Keywords:** attenuation system of traction motor field, AC and DC electric locomotives, inductive shunt, field reduction resistor, power semiconductor devices, energy-saving control method

**Information about the article:** Received February 4, 2019; accepted for publication March 14, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Volchek T.V., Melnichenko O.V., Shramko S.G., Linkov A.O. Analysis of methods and technical equipment of traction motor field attenuation systems for AC and DC electric locomotives. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):531–542. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-531-542

## 1. ВВЕДЕНИЕ

ОАО «РЖД» является одним из крупнейших потребителей электроэнергии в России. В общем энергопотреблении железных дорог большую часть составляет расход электроэнергии на тягу поездов. При решении задач по расширению объема перевозок, наряду с ростом цен на электроэнергию, одной из важнейших задач «Энергетической стратегии холдинга «РЖД» до 2030 г.» является реализация энергосберегающих технологий, которые позволят снизить расходы электроэнергии на тягу поездов [1].

Для расширения диапазона регулирования скорости поезда на электрическом подвижном составе (ЭПС) возникает необходимость использования системы регулирования ослабления поля тяговых электродвигателей (ОП ТЭД). Благодаря этому увеличивается пропускная способность тяговых участков железной дороги, сокращается количество электровозов в эксплуатации, а также локомотивных бригад, снижается программа ремонта локомотивов и т. д. Заметим, что ОП ТЭД электровоза реализуется за счет шунтирования обмотки возбуждения (ОВ) резистором с индуктивным шунтом (ИШ) или импульсным регулированием<sup>1</sup>.

## 2. СИСТЕМА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

С 1932 г., когда был выпущен первый советский электровоз постоянного тока серии Сс11-01 (Сурамский электровоз), одним из способов регулирования диапазона скорости являлся способ регулирования ОП ТЭД. На всех Сурамских электровозах (С, Си, Сс, ВЛ19, СК, ВЛ22), выпускаемых с 1932 по 1941 г., и на электровозе серии ВЛ22<sup>м</sup>, выпущенного после Великой Отечественной войны, система ОП ТЭД имела две ступени – 67 и 50% возбуждения, которое осуществлялось за счет шунтирования ОВ резистором с ИШ, предназначенного для улучшения переходных процессов при колебаниях напряжения на ТЭД<sup>2</sup> [2].

При выпуске последующих электровозов серий (ВЛ8, ВЛ23, ВЛ10, ВЛ11, ЧС1, ЧС2 и др.) увеличивалось количество ступеней ОП ТЭД, которые осуществлялись при уменьшении сопротивления шунтирующего резистора с помощью контакторов<sup>3,4,5</sup> [3, 4]. Таким образом, системы ОП ТЭД электровозов постоянного тока с коллекторными ТЭД имели от двух до пяти ступеней ОП. Допу-

<sup>1</sup>Плакс А.В. Система управления электрическим подвижным составом: учебник для вузов ж.-д. транспорта. М.: Маршрут, 2005. 360 с. / Plaks A.V. Electric rolling stock control system: a textbook for transport universities. M.: Marshrut, 2005. 360 p.

<sup>2</sup>Руководство по эксплуатации. Электровоз ВЛ22м: утв. Министерством путей сообщения. М., 1961. 235 с. / User's Manual. Electric locomotive VL22m: approved by the Ministry of Railways. Moscow, 1961. 235 p.

<sup>3</sup>Руководство по эксплуатации. Электровоз ВЛ8. М., Транспорт, 1982. 320 с. / User's Manual. Electric locomotive VL8. M., Transport, 1982. 320 p.

<sup>4</sup>Руководство по эксплуатации. Электровоз ВЛ10: утв. Министерством путей сообщения. М., Транспорт, 1975. 235 с. / User's Manual. Electric locomotive VL10: approved by the Ministry of Railways. Moscow, Transport, 1975. 235 p.

<sup>5</sup>Руководство по эксплуатации. Электровоз ВЛ11 / Под. ред. Г.И. Чиракадзе и О.А. Кикнадзе. М., Транспорт, 1983. 464 с. / User's Manual. Electric locomotive VL11 / Under edition of G.I. Chirakadze and O.A. Kiknadze Moscow, Transport, 1983. 464 p.

стимая ступень ОП зависит от коммутационной устойчивости ТЭД и определяется при конструировании и испытании первых опытных образцов.

На примере электровозов ВЛ22<sup>м</sup>, ВЛ15 и ЧС2<sup>т</sup> на рис. 1 приведены системы с двумя, четырьмя и пятью ступенями ОП ТЭД электровозов постоянного тока соответственно.

Для обеспечения первой ступени ОП ТЭД замыкается контактор (К1) и параллельно ОВ подключается резистор (R1), рис. 1 а, б, с. Для обеспечения второй ступени ОП на электровозах ВЛ22<sup>м</sup> и ВЛ15 уменьшается сопротивление шунтирующего резистора (R1) при замыкании контактора (К2) рис. 1 а, б. Третья и четвертая ступени ОП ТЭД электровоза ВЛ15 обеспечиваются аналогично с помощью замыкания контакторов (К3, К4), рис. 1 б. На электровозе ЧС2<sup>т</sup> вторая ступень ОП обеспечивается при замкнутом К2, тогда параллельно ОВ подключается резистор (R2). Для обеспечения третьей ступени ОП включается К3, и параллельно ОВ подключается резистор (R3). Для обеспечения четвертой ступени ОП включены К1-К3, тогда параллельно ОВ

подключаются резисторы (R1-R3). Для обеспечения пятой ступени включены все К1-К4 и параллельно ОВ подключаются резисторы (R1-R4), это представлено на рис. 1, а также в литературных источниках<sup>2</sup> [3, 4].

### 3. СИСТЕМА ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ЭЛЕКТРОВОЗАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В 1938 г. был выпущен первый электровоз переменного тока ОР-22, в котором одним из способов регулирования диапазона скорости (как и на электровозах постоянного тока) являлся способ регулирования ОП ТЭД. Параллельно ОВ ТЭД подключался резистор постоянной шунтировки, который обеспечивал постоянное ослабленное поле ТЭД на 10%. Система ОП ТЭД имела одну ступень – 50% возбуждения, которая осуществлялась переключателем ОП – ПШ-60. Такую же систему ОП ТЭД имели последующие электровозы серии Н-О (Новочеркасский Однофазный), впоследствии ВЛ61 (что означало Владимир Ленин, 6-осный, тип 1) [2].

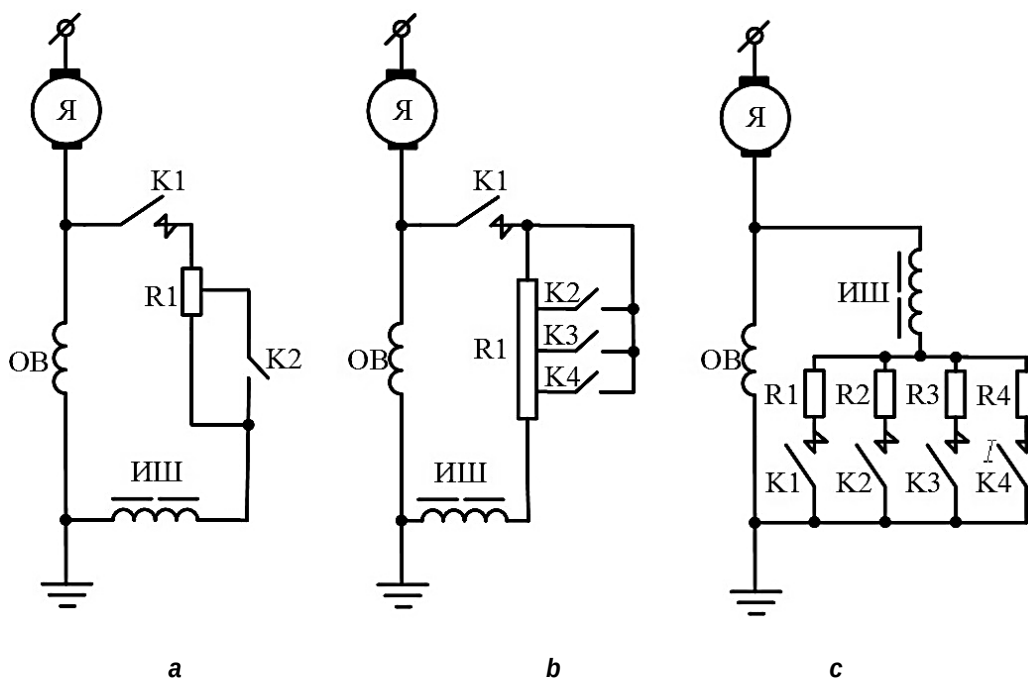


Рис. 1. Система ослабления поля тяговых электродвигателей электровозов постоянного тока: а – ВЛ22<sup>м</sup>; б – ВЛ15; с – ЧС2<sup>т</sup>

Fig. 1. Traction motor field attenuation system of DC electric locomotives: а – VL22<sup>m</sup>; б – VL15; с – CHS2<sup>t</sup>

На первых двух электровозах серии Н60 (ВЛ60), выпущенных в 1957 г., количество ступеней ОП ТЭД увеличилось до четырех – 75, 60, 52 и 43% возбуждения. Начиная с электровоза ВЛ60-003, количество ступеней ОП было уменьшено с четырех до трех, изменено включение шунтирующих сопротивлений, а переключатель ПШ-60 заменен индивидуальными контакторами<sup>6</sup>. Такое устройство систем ОП ТЭД имеют все отечественные электровозы переменного тока серий ВЛ80в/и, ВЛ85, ВЛ65, ЭП1в/и, 2ЭС5К, рис. 2. Отличие систем ОП ТЭД заключается только лишь в коэффициенте ослабления возбуждения на каждой из трех ступеней ОП ТЭД<sup>6,7,8</sup>.

Устройство ОП ТЭД электровозов переменного тока состоит из резистора постоянной шунтировки (R0), резистора ОП (R1) с промежуточным выводом, трех контакторов

(K1-K3) и ИШ, рис. 2. Чтобы получить несколько ступеней ОП ТЭД электровоза, необходимо ступенями изменить сопротивление R1 с помощью K1-K3. При замыкании K1 параллельно ОВ в цепь вводится полностью весь R1. Обеспечивается первая ступень ОП ТЭД электровоза. Замкнув K2, а затем при необходимости K3, ступенями уменьшается сопротивление R1 и обеспечивается вторая и третья ступени ОП ТЭД, соответственно<sup>6,7,8</sup>.

С 1964 г. начался выпуск первых пассажирских электровозов переменного тока серии ЧС4, которые имели также 3 ступени ОП – 72,6, 53 и 44%. После испытаний первых электровозов ЧС4 было внесено ряд изменений, и с 1966 г. электровозы ЧС4 имеют пять ступеней ОП – 72, 60, 51, 44 и 40%. Такую же систему ОП ТЭД имеют электровозы ЧС8, выпускаемые с 1983 г. [5, 6].

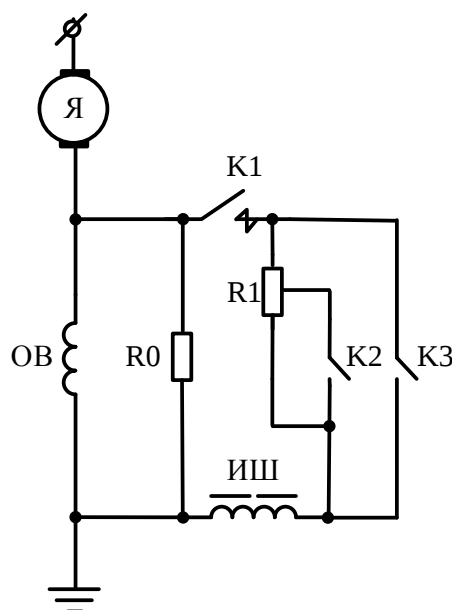


Рис. 2. Система ОП ТЭД электровозов переменного тока  
 серии ВЛ80в/и, ВЛ65, ВЛ85, ЭП1в/и, 2ЭС5К  
 Fig. 2. Traction motor field attenuation system for AC electric locomotives  
 of VL80 v/i, VL65, VL85, EP1v/i, 2ES5K series

<sup>6</sup>Руководство по эксплуатации. Электровоз ВЛ85 / Под. ред. Б.А. Тушканова, Л.А. Пушкарева, Л.А. Поздняковой. М.: Транспорт, 1992. 480 с. / User's Manual. Electric locomotive VL85/ Under edition of B.A. Tushkanov, L.A. Pushkarev, L.A. Pozdnyakova. M.: Transport, 1992. 480 p.

<sup>7</sup>Руководство по эксплуатации. Электровоз ЭП1. Введ. Всерос. науч.-иссл. и проектно-конструктор. ин-том электровозостроения. 1996–2005 гг. Т. 1. / User's Manual. Electric locomotive EP1. Introduced by All-Russian scientific research and design Institute of electric locomotive engineering. 1996-2005. V.1

<sup>8</sup>Руководство по эксплуатации. Электровоз 2ЭС5К. Введ. ОАО «ВЭЛНИИ» 04.04.06. М.: Транспорт, 2006. Кн. 1. 249 с. / User's Manual. Electric locomotive 2ES5K. Introduced by OJSC VELNII 4 April 2006. M.: Transport, 2006. Book. 1. 249 p.



Менее глубокое ослабление поля тяговых электродвигателей электровозов переменного тока (по сравнению с электровозами постоянного тока) объясняется более сложными условиями коммутации ТЭД из-за наличия пульсирующей составляющей выпрямленного тока. Для улучшения коммутаций ТЭД электровозов переменного тока (за счет уменьшения пульсации основного магнитного потока) параллельно ОВ включается резистор постоянной шунтировки, обеспечивающий небольшое постоянное ОП. В этом заключается основное отличие систем ОП ТЭД электровозов переменного тока от электровозов постоянного тока.

Система ОП ТЭД на электровозах постоянного и переменного тока контакторно-реостатного типа. Недостатком данной системы ОП ТЭД является то, что при ее реализации имеет место повышенный расход электрической энергии на тягу поездов, при работе электровоза существенно искажается форма кривой тока тяговой сети, что вызывает ухудшение условий работы электровоза, переключение с одной ступени на другую происходит ступенчато, что всегда сопровождается резким увеличением тока электровоза. Наличие индуктивного шунта, который имеет более 100 кг медной шины, что приводит к многочисленным случаям его хищения и, соответственно, неработоспособности системы ОП, а также повышению стоимости ремонта.

#### **4. АНАЛИЗ НАУЧНЫХ ТРУДОВ, ПОСВЯЩЕННЫХ СИСТЕМЕ ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗОВ ПОСТОЯННОГО ИЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКОВ**

Известны научные труды ученых и специалистов, которые посвящены совершенствованию системы ОП ТЭД электровозов. Целью их исследования было исключить ИШ из силовой цепи электровоза и при этом сохранить обеспечение надежной защиты при нестационарных режимах его работы. Рассмотрим основные способы усовершенствованных систем ОП ТЭД, выявленные при анализе патентов и научных трудов.

В работе [7] предложено устройство системы ОП ТЭД на основе полупроводниковых элементов и коммутирующего конденсатора. На рис. 3 представлена система ОП ТЭД, содержащая два тиристора ( $VS1$ ,  $VS2$ ), конденсатор ( $C_k$ ), два резистора ( $R1$ ,  $R2$ ) и два датчика тока ( $DT1$ ,  $DT2$ ). Блок управления (БУ) подает сигнал управления на согласующий блок 2, который формирует отпирающий импульс на  $VS2$ . После его включения параллельно ОВ ТЭД подключается  $R2$  и переходит в режим ОП.

При возникновении нестационарных режимов отношение напряжений (поступающих с  $DT1$ ,  $DT2$  на БУ) становится меньше установленной величины, тогда БУ подает сигнал управления на согласующий блок 1, который подает сигнал на включение  $VS1$ . Тогда  $VS1$  подключает  $C_k$  параллельно  $VS2$  обратной полярностью, и  $VS2$  выключается. После этого разрывается цепь разряда конденсатора через  $VS1$ , и  $VS1$  также выключается. Заметим, что ТЭД переходит в режим ПП. Конденсатор начинает заряжаться от преобразователя напряжения с гальванической развязкой 3 через  $R1$ .

Недостатком способа является то, что заряд конденсатора может оказаться недостаточным для выключения тиристора во время нестационарных режимов, что обуславливает низкую надежность устройства. Переключение с полного поля на ослабленное происходит ступенчато, что сопровождается резкими бросками тока электровоза.

В работе [8] предлагается устройство системы ОП ТЭД, построенное на автоматическом восстановлении заданного коэффициента ОП после нестационарного режима. На рис. 4 представлена система ОП ТЭД, содержащая два датчика тока ( $DT1$ ,  $DT2$ ), контактор ( $K1$ ), четыре резистора ( $R1$ - $R2$ ) и четыре ключевых элемента ( $VT1$ - $VT4$ ). Система управления ОП ТЭД включает в себя счетчик импульсов, который получает сигналы с генератора импульсов 8, триггера и логического элемента И-НЕ 10 и подает сигналы на: согласующие блоки 1-4; формирователь импульсов 6; инвертор 5; логический элемент И-НЕ 7; компаратор 9, принимающий сигналы с  $DT1$ ,  $DT2$ .

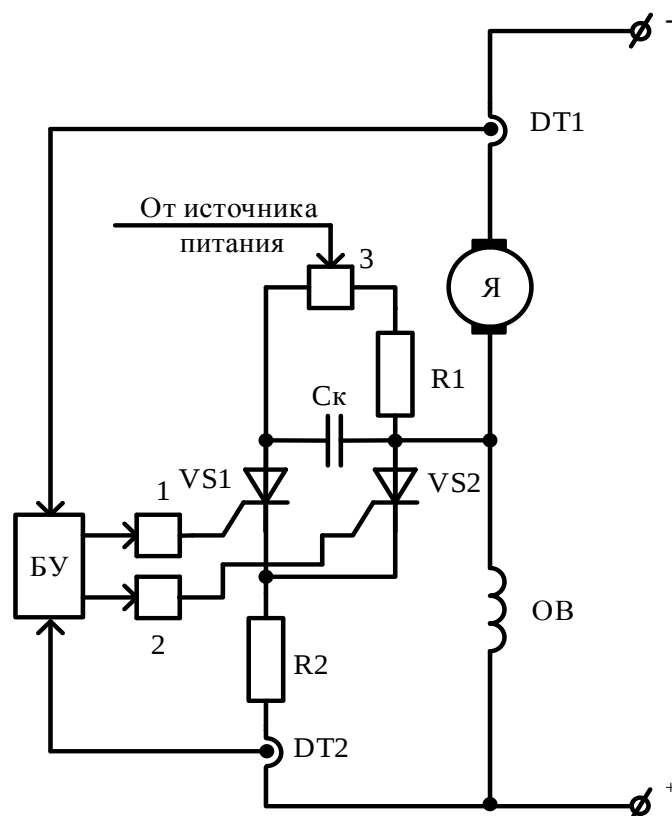
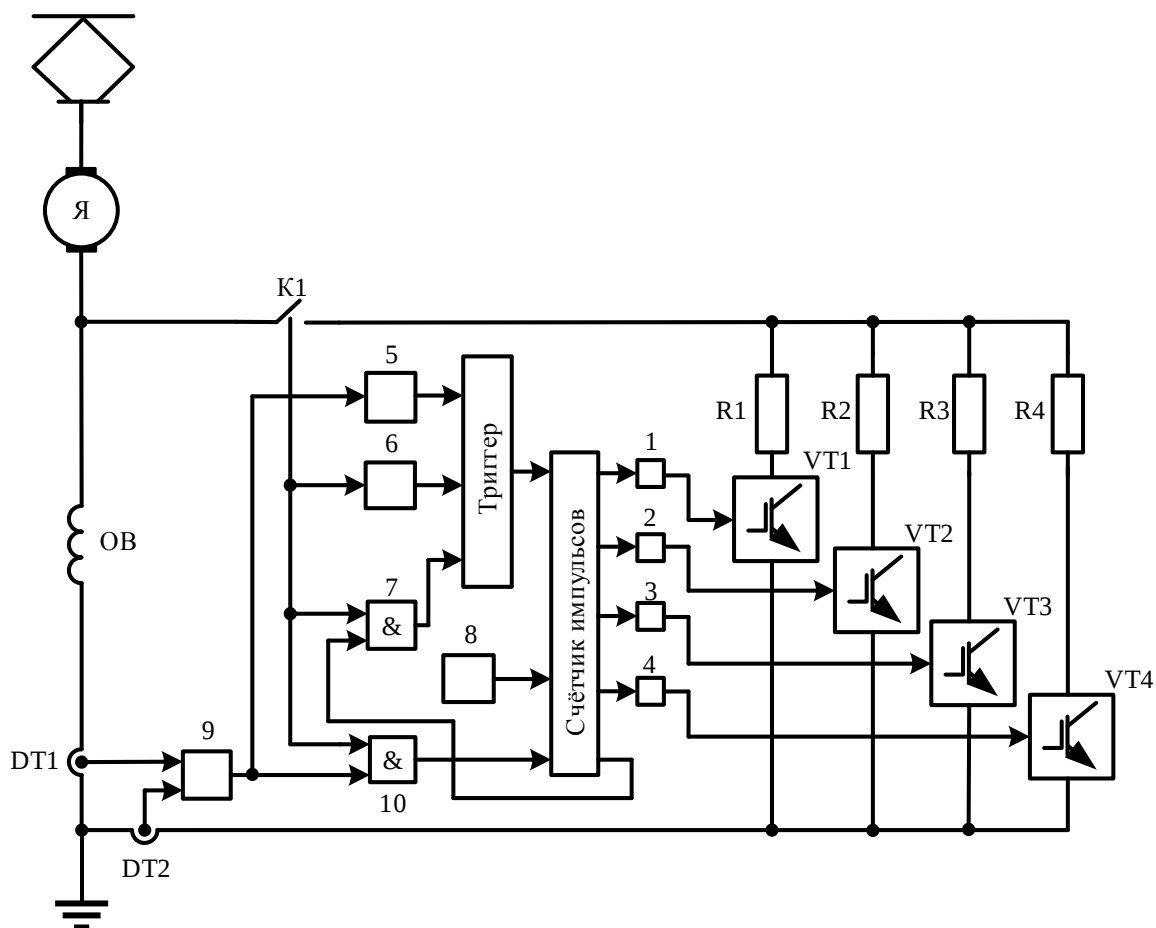


Рис. 3. Система ослабления поля тяговых электродвигателей на основе тириستоров  
 Fig. 3. Thyristor-based traction motor field attenuation system

Данное устройство работает следующим образом: при включении К1 параллельно ОВ ТЭД подключается цепь регулирования возбуждения ТЭД. С К1 подается сигнал управления на формирователь импульсов 6. После того как инверсный выход триггера устанавливается в «ноль», счетчик импульсов начинает счет, на счетный вход которого подаются импульсы с генератора импульсов 8. С приходом каждого импульса состояние счетчика импульсов увеличивается на единицу. Сигналы управления со счетчика импульсов на VT1-VT4 поступают через согласующие блоки 1-4. Каждому состоянию счетчика импульсов соответствует комбинация включенных и выключенных VT1-VT4 и R1-R4. С увеличением значения выходов счетчика импульсов от нуля до максимальной величины (пятнадцати) общее сопротивление R1-R4 линейно уменьшается. Коэффициент ОП плавно изменяется в заданном диапазоне. При достижении счетчиком импульсов значения максималь-

ной величины сигнал низкого уровня с его выхода через логический элемент И-НЕ 7 сбрасывает триггер, а счет счетчиком импульсов прекращается.

При нестационарном режиме ток якоря растет значительно быстрее тока возбуждения, это может привести к резкому уменьшению коэффициента ОП ТЭД. Для ограничения ОП ТЭД задается пороговая величина коэффициента ОП. Таким образом, при уменьшении коэффициента ОП меньше заданной величины напряжение на выходе DT2 будет больше напряжения на выходе DT1, на выходе компаратора 9 образуется сигнал низкого уровня, который через логический элемент И-НЕ 10 устанавливает выходы счетчика импульсов в логический «ноль» и через инвертор 5 инверсный выход триггера устанавливается в «ноль». Заметим, что ТЭД переходит в режим ПП и процесс регулирования коэффициента ОП циклически повторяется до окончания переходного процесса.



**Рис. 4. Система ослабления поля тяговых электродвигателей  
на основе алгоритма восстановления заданного коэффициента ослабления поля**  
**Fig. 4. Traction motor field attenuation system based on the reconstruction  
algorithm for the given field reduction coefficient**

Недостатками способа является то, что данное устройство неспособно обеспечить надежную работу ТЭД на сложных участках рельсового пути. Алгоритм восстановления коэффициента ОП построен в автоматическом режиме без участия машиниста электровоза. Поэтому на горных перевалах на спуске система управления ОП ТЭД сработает на увеличение тягового усилия электровоза, что может привести к разрыву автосцепок, потому как большая часть вагонов будет находиться еще на подъеме горного перевала. Устройство усложнено дополнительными элементами, имеет простую систему управления.

В работе [9] предлагается система ОП ТЭД, содержащая резистор постоянной шунтировки ( $R_0$ ), резистор ОП ( $R_1$ ), три контактора ( $K_1$ - $K_3$ ), два MOSFET-транзистора

( $VT_1$ - $VT_2$ ), рис. 5. При включенном  $VT_1$  и  $K_1$  включается  $VT_2$ , и параллельно ОБ подключается  $R_1$ , так обеспечивается первая ступень ОП ТЭД. Для обеспечения второй и третьей ступеней ОП ТЭД (с помощью  $K_2$ - $K_3$ ) необходимо уменьшить сопротивление  $R_1$ . При увеличении тока в шунтирующей цепи и напряжения выше заданного значения система управления отключает транзисторы и ТЭД переходит в режим ПП.

Недостатком устройства является то, что переключение с ПП на ослабленное происходит ступенчато, что сопровождается резким увеличением тока электровоза. А также существенным недочетом является непредусмотренная защита транзистора от выброса напряжения при коммутации индуктивной нагрузки.

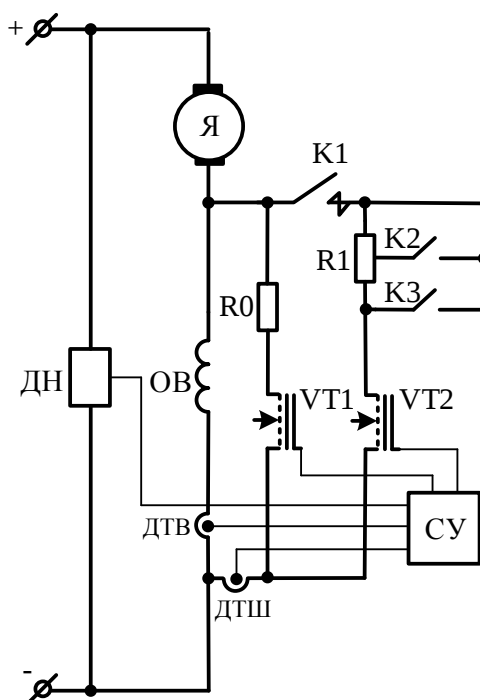


Рис. 5. Схема электронного шунта на MOSFET-транзисторах  
 Fig. 5. MOSFET-based electronic shunt circuit

В работе [10] представляется устройство для регулирования скорости ТЭД электровоза на базе импульсно-резистивного шунта ИРШ-К4, рис. 6. Предложенные устройства содержат резистор (R1), реле предельного тока возбуждения (KA1) и два контактора (K1, K2). Устройство имеет схему управления шунтовой цепью регулирования ОП ТЭД, содержащую следующие элементы: контроллер машиниста (KM), который подключается к отдельному источнику питания (G1); промежуточные реле (KV1, KV2, KV3) с контактами (KV1.1, KV2.1-KV2.2, KV3.1-KV3.2); электропневматические контакторы первой и второй ступеней ОП (K1, K2); четыре разделительных диода (VD1-VD2); две сигнальные лампочки (H1, H2), которые сигнализируют машинисту о состоянии шунтовой цепи.

Данное устройство работает следующим образом: для включения первой ступени ОП ТЭД необходимо замкнуть контакт SM1 KM, при этом создается цепь питания контактора K1. После включения контактора K1 замыкается контакт K1.1, и параллельно ОБ ТЭД включается R1 и последовательно ему KA1. Так же создается цепь питания H1.

Для обеспечения второй ступени ОП необходимо замкнуть контакт SM2 KM, при этом создается цепь питания контактора K2. После включения контактора K2 замыкается контакт K2.1 и параллельно ОБ ТЭД включается часть величины сопротивления R1, последовательно ей включается KA1. Так же создается цепь питания H2.

При возникновении нестационарного режима на первой ступени ОП ТЭД в шунтирующей цепи величина тока превысит предельно заданную величину, произойдет срабатывание KA1 и замыкание его контакта KA1.1, который создает цепь питания KV3. Включившись, KV3 разомкнет свои контакты KV3.2, тем самым контактор K1 потеряет питание и разомкнет свои контакты K1.1. Это приведет к отключению шунтирующей цепи, и ТЭД перейдет в режим ПП. При этом H1 гаснет.

При возникновении нестационарного режима на второй ступени ОП ТЭД после срабатывания KA1 и замыкания его контакта KA1.1, который создает цепь питания KV2. Включившись, KV2 разомкнет свои контакты KV2.2, тем самым контактор K2 потеряет питание и разомкнет свои контакты K2.1. Это приведет

к отключению отдельной части сопротивления шунтирующей цепи. При разомкнутом контакте KV2.2 реле KV2 прерывается цепь питания KV1, которая отключается и замыкает свои контакты KV1.1, тем самым замыкает цепь питания на KV3. Далее цикл работы устройства повторяется.

Недостатком системы является то, что переключение с ПП ТЭД на ОП происходит ступенчато, что сопровождается резким увеличением тока электровоза. Система ОП ТЭД является релейной, поэтому устройство имеет низкую надежность.

## 5. ПРЕДЛАГАЕМАЯ СИСТЕМА ОСЛАБЛЕНИЯ ПОЛЯ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОВОЗА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА НА ОСНОВЕ IGBT-ТРАНЗИСТОРА

Проанализировав научные труды ученых и специалистов по совершенствованию системы ОП ТЭД можно сделать вывод, что предлагаемые системы ОП ТЭД сложны в реализации, увеличивают массогабаритные показатели системы ОП ТЭД, снижают ее надежность. В эксплуатации должно быть обеспечено удобное и простое управление процессом ОП ТЭД, который должен

обладать следующими критериями: ресурсосбережением, резервностью, высокой надежностью, а также высокими энергетическими показателями [11]. В связи с этим предлагается система ОП ТЭД на основе IGBT-транзисторов, применение которых играет огромную роль в развитии железнодорожного транспорта [12]. Данная система, рис. 7, позволяет исключить ИШ, обеспечить надежную работу при нестационарных режимах работы, при этом управление IGBT-транзисторами позволит повлиять на энергопотребление поездов в режиме тяги [13, 14]. Применение IGBT-транзисторов играет огромную роль в развитии.

Данная система состоит из последовательно включенного диода (VD1) и IGBT-транзистора (VT); драйвера IGBT-транзистора 1, вход которого подключен к БУ шунтирования поля, а выход – к IGBT-транзистору диода (VD2), который подключен к положительной шине питания ТЭД и служит для защиты IGBT-транзистора от выбросов напряжения при коммутации индуктивной нагрузки; датчика тока (DT), размещенного в цепи якорной обмотки ТЭД для измерения тока, протекающего в цепи; датчика напряжения 2, включенного в обмотку собственных нужд (ОСН) силового трансформатора для синхронизации силовых цепей и цепей

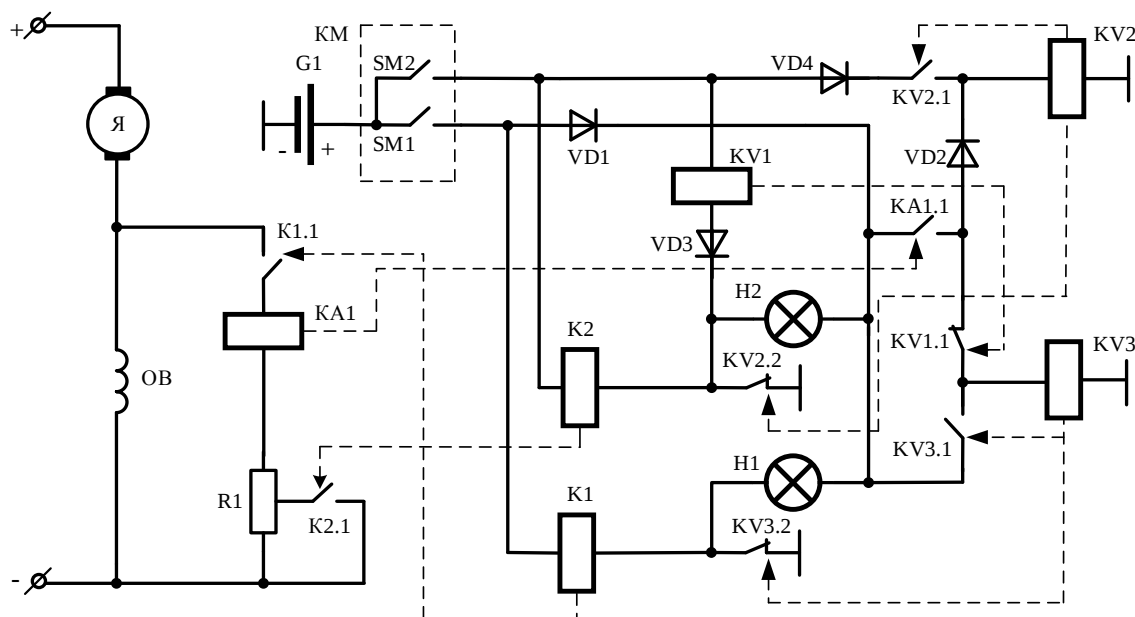


Рис. 6. Система ослабления поля тяговых электродвигателей на основе импульсно-резистивного шунта

Fig. 6. Traction motor field attenuation system based on an impulse-resistive shunt

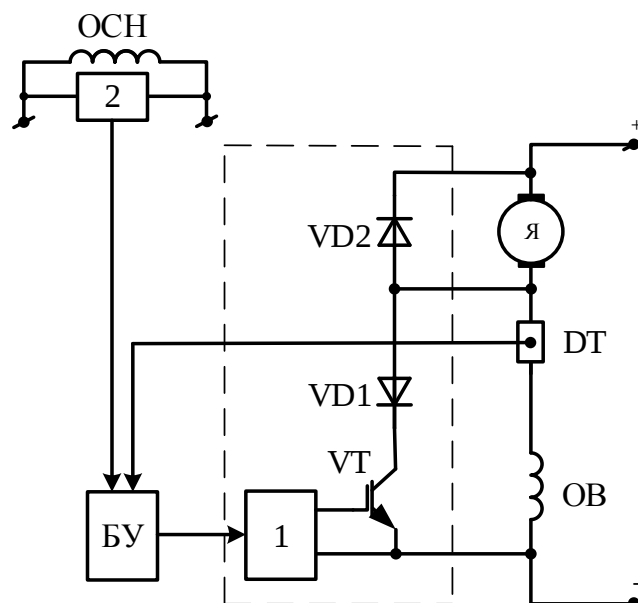


Рис. 7. Предлагаемая система ослабления поля тяговых электродвигателей на основе IGBT-транзистора электровоза переменного тока  
 Fig. 7. Proposed traction motor field attenuation system based on an IGBT-transistor of the AC electric locomotive

управления. БУ по сигналу DT формирует импульсы управления IGBT-транзистором по критерию максимального коэффициента мощности электровоза, который осуществляется за счет того, что управляющий импульс на IGBT-транзистор подается только в активной части потребляемой энергии, благодаря этому ее реактивная составляющая после выключения IGBT-транзистора уменьшается. При возникновении аварийного режима подача импульсов не осуществляется, а работа схемы организуется в режиме ПП.

Достоинствами предложенной системы ОП ТЭД являются:

- исключение медесодержащего индуктивного шунта, срок службы которого значительно меньше срока службы IGBT-транзистора, поэтому уменьшаются затраты на ремонт и обслуживание системы;
- благодаря алгоритму управления IGBT-транзисторами уменьшается расход

электроэнергии на тягу поездов;

- за счет снижения потребления реактивной мощности повышается быстродействие системы ОП ТЭД, обеспечивается плавное регулирование тока возбуждения и надежная защита в нестационарных режимах работы электровоза.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен анализ существующих систем ОП ТЭД электровозов постоянного и переменного токов, выявлены их достоинства и недостатки.

2. Разработана и предложена усовершенствованная система ОП ТЭД электровоза переменного тока, позволяющая заменить ИШ на IGBT-транзистор с реализацией энергосберегающего алгоритма управления, при этом обеспечивая надежную защиту при нестационарных режимах работы электровоза.

## Библиографический список

1. Никифоров М.М., Каштанов А.Л., Комяков А.А. О работе по актуализации энергетической стратегии холдинга «Российские железные дороги» на период

до 2020 года и на перспективу до 2030 года // Повышение энергетической эффективности наземных транспортных систем: материалы II Междунар. науч.-практ. конф. (г. Омск, 8 декабря 2016 г.). Омск, 2016.



С. 159–165.

2. Раков В.А. Локомотивы железных дорог Советского Союза. М.: Транспорт, 1956. 433 с.

3. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1956–1965). М.: Транспорт, 1966. 248 с.

4. Лисицын А.Л., Никитин А.С., Моховиков Д.И. Пассажирский электровоз ЧС2т. М.: Транспорт, 1979. 288 с.

5. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1966–1975). М.: Транспорт, 1979. 213 с.

6. Раков В.А. Локомотивы и моторвагонный подвижной состав железных дорог Советского Союза (1976–1985). М.: Транспорт, 1990. 238 с.

7. Пат. № 2369492, Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования скорости электроподвижного состава / А.С. Мазнев, А.М. Евстафьев; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. № 2008124695/11; заявл. 16.06.2008; опубл. 10.10.2009. Бюл. № 28.

8. Пат. № 2283248, Российская Федерация, МПК В60L15/04, H02P7/06. Устройство для регулирования возбуждения тягового электродвигателя постоянного тока / А.С. Мазнев, А.М. Евстафьев; заявитель и патентообладатель Петербургский гос. ун-т путей сообщения. № 2005103681/11; заявл. 11.02.2005; опубл. 10.09.2006. Бюл. № 25.

9. Калинин М.В. Влияние параметров полупроводниковых приборов на характеристики электровозов переменного тока в режиме ослабления возбуждения // Известия Петербургского ун-та путей сообщения. 2010. Вып. 3. С. 114–123.

10. Пат. № 119695, Российская Федерация, МПК В60L15/08. Устройство для регулирования скорости тяговых электродвигателей электровоза / А.В. Воротикин, А.П. Хоменко, С.К. Каргапольцев, Е.В. Ярилов, С.В. Кучеров, А.В. Ларченко; заявитель и патентообладатель Иркутский гос. ун-т путей сообщения. № 2012108233/11; заявл. 05.03.2012; опубл. 27.08.2012. Бюл. № 24.

11. Villani S. 8 big challenges for European railfreight // IRJ International Railway Journal The future of freight, 2010. P. 20–23.

12. Sintra tests confirm potential of low-cost repowering // Railway Gazette international Whole-life efficiency drives traction development, 2016. P. 36–37. [Электронный ресурс]. URL: [http://nomad-dital.com/uploads/Sintra\\_tests\\_confirm\\_potential\\_of\\_low-cost\\_repowering.pdf](http://nomad-dital.com/uploads/Sintra_tests_confirm_potential_of_low-cost_repowering.pdf) (дата обращения: 08.04.2018)

13. Волчек Т.В., Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О. Снижение затрат электрической энергии на тягу поездов при использовании системы ослабления поля тяговых электрических двигателей электровозов переменного тока // Resonances science: материалы III Междунар. науч.-практ. конф. (Чехия, г. Карловы Вары, 7–8 ноября 2018 г.). Карловы Вары, 2018. С. 81–87.

14. Melnichenko O., Linkov A., Yagovkin D. Development of scientific-and-experimental stand to study operating processes of new transistor converter of alternating current locomotive // International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT, 2017. P. 134–144.

## References

1. Nikiforov M.M., Kashtanov A.L., Komyakov A.A. *O rabote po aktualizacii energeticheskoy strategii holdinga «Rossijskie zheleznye dorogi» na period do 2020 goda i na perspektivu do 2030 goda* [On updating of the energy strategy of the holding company “Russian Railways” for the period until 2020 and up to 2030]. *Materialy II Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Povyshenie energeticheskoy effektivnosti nazemnyh transportnyh sistem”* [Proceedings of the II International scientific and practical conference “Improving energy efficiency of land transport systems”, Omsk, 8 December 2016]. Omsk, 2016, pp. 159–165. (In Russ.).

2. Rakov V.A. *Lokomotivy zheleznyh dorog Sovetskogo Soyuz* [Locomotives of the Soviet Union railways]. Moscow: Transport Publ., 1956, 433 p. (In Russ.).

3. Rakov V.A. *Lokomotivy i motorvagonnyj podvizhnoj sostav zheleznyh dorog Sovetskogo Soyuz* (1956–1965) [Locomotives and motor-railway car rolling stock of the Soviet Union railways (1956–1965)]. Moscow: Transport Publ., 1966, 248 p. (In Russ.).

4. Lisicyn A.L., Nikitin A.S., Mohovikov D.I. *Passazhirskij elektrovoz ChS2t* [Passenger electric locomotive CHS2t]. Moscow: Transport Publ., 1979, 288 p. (In Russ.).

5. Rakov V.A. *Lokomotivy i motorvagonnyj podvizhnoj*

*sostav zheleznyh dorog Sovetskogo Soyuz* (1966–1975) [Locomotives and motor-railway car rolling stock of the Soviet Union railways (1966–1975)]. Moscow: Transport Publ., 1979, 213 p. (In Russ.).

6. Rakov V.A. *Lokomotivy i motorvagonnyj podvizhnoj sostav zheleznyh dorog Sovetskogo Soyuz* (1976–1985) [Locomotives and motor-railway car rolling stock of the Soviet Union railways (1976–1985)]. Moscow: Transport Publ., 1990, 238 p. (In Russ.).

7. Maznev A.S., Evsta'ev A.M. *Ustrojstvo dlya regulirovaniya skorosti elektropodvizhnogo sostava* [Electric rolling stock speed control device]. Patent RF, no. 2369492, 2009.

8. Maznev A.S., Evsta'ev A.M. *Ustrojstvo dlya regulirovaniya возбуждения тягового электродвигателя постоянного тока* [DC traction motor excitation control device]. Patent RF, no. 2005103681/11, 2006.

9. Kalinin M.V. Influence of semiconductor device parameters on the characteristics of AC locomotives in the excitation attenuation mode. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putej soobshcheniya* [Izvestia of St. Petersburg University of means of communication]. 2010, issue. 3, pp. 114–123. (In Russ.).

10. Vorotilkin A.V., Homenko A.P., Kargapol'cev S.K., Yarilov E.V., Kucherov S.V., Larchenko A.V. *Ustrojstvo*

dlya regulirovaniya skorosti tyagovyh elektrodvigatelej elektrovoza [Control device for electric locomotive traction motor speed]. Patent RF, no. 2012108233/11, 2012.  
11. Villani S. 8 big challenges for European railfreight. IRJ International Railway Journal The future of freight, 2010, pp. 20–23.

12. Sintra tests confirm potential of low-cost repowering // Railway Gazette international Whole-life efficiency drives traction development, 2016, pp. 36–37. Режим доступа: [http://nomad-digital.com/uploads/Sintra\\_tests\\_confirm\\_potential\\_of\\_low-cost\\_repowering.pdf](http://nomad-digital.com/uploads/Sintra_tests_confirm_potential_of_low-cost_repowering.pdf) (08.04.2018)

13. Volchek T.V., Mel'nichenko O.V., Shramko S.G., Lin'kov A.O. Snizhenie zatrat elektricheskoy energii na tyagu poezdov pri ispol'zovanii sistemy oslableniya polya

tyagovyh elektricheskikh dvigatelej elektrovozov peremennogo toka [Reducing the costs of electric energy for train traction when using the field attenuation system of traction electric motors of AC electric locomotives]. Materialy III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Resonances science" [Materials of the III International. Scientific and practical conference, Czech Republic, Karlovy Vary, 2018]. Karlovy Vary, 2018, pp. 81–87.

14. Mel'nichenko O.V., Lin'kov A.O., Yagovkin D.A. Development of scientific-and-experimental stand to study operating processes of new transistor converter of alternating current locomotive. International Scientific Conference Energy Management of Municipal Transportation Facilities and Transport EMMFT, 2017, pp. 134–144.

#### **Критерии авторства**

Волчек Т.В., Мельниченко О.В., Шрамко С.Г., Линьков А.О. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Volchek T.V., Melnichenko O.V., Shramko S.G., Linkov A.O. have equal authors rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

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

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Волчек Татьяна Витальевна**,  
аспирант,  
Иркутский государственный университет путей  
сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия,  
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Tatiana V. Volchek**,  
Postgraduate,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: tanya.vol4eck@yandex.ru

**Мельниченко Олег Валерьевич**,  
доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой электроподвижного состава,  
Иркутский государственный университет путей  
сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия,  
e-mail: olegmelnval@mail.ru

**Oleg V. Melnichenko**,  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Head of the Department of Electric Rolling Stock,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: olegmelnval@mail.ru

**Шрамко Сергей Геннадьевич**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры электроподвижного состава,  
Иркутский государственный университет путей  
сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия,  
e-mail: novorossereg@mail.ru

**Sergey G. Shramko**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Electric Rolling Stock,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: novorossereg@mail.ru

**Линьков Алексей Олегович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры электроподвижного состава,  
Иркутский государственный университет путей  
сообщения,  
664074, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия,  
e-mail: linkovalex@mail.ru

**Aleksei O Linkov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department of Electric Rolling  
Stock,  
Irkutsk State Transport University,  
15 Chernyshevsky St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: linkovalex@mail.ru



## Экспериментальное исследование теплообмена нагретых материалов при конвейерной транспортировке

© И.В. Калинин, В.А. Кулагин

*Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия*

**Резюме:** В настоящей работе проведены экспериментальные исследования нагретых материалов с температурой поверхности от 313 до 363 К, транспортируемых в производственных условиях при помощи конвейеров с целью получения данных, необходимых при проектировании систем отопления и вентиляции конвейерных галерей. Экспериментальные исследования проведены аналитически в лабораторном масштабе на стенде, позволившем максимально точно смоделировать натурные условия, соответствующие производственным. Определены факторы, влияющие на теплообмен нагретых материалов с температурой от 313 до 363 К в условиях конвейерной транспортировки, а также получены расчетные зависимости для определения тепловыделений от поверхности данных материалов. Представленные в настоящей работе данные можно считать более достоверными по сравнению с результатами авторов предыдущих исследований, поскольку проведенные ими работы осуществлены на менее совершенном оборудовании, не позволяющем точно смоделировать натурные производственные условия. Выявлены эмпирические зависимости, позволяющие определить локальные и средние коэффициенты общей и конвективной теплоотдачи при конвейерной транспортировке материалов с температурой от 313 до 363 К, а также рассчитать тепловой поток, поступающий от их поверхности. Полученные данные необходимы при проектировании систем отопления и вентиляции производственных помещений, в которых осуществляется конвейерная транспортировка нагретых материалов с температурой поверхности от 313 до 363 К.

**Ключевые слова:** конвекция, коэффициент конвективной теплоотдачи, теплообмен, теплопередача, теплоперенос

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Красноярского края в рамках научных проектов № 18-48-242001, 18-41-242004, 18-41-242008.

**Информация о статье:** Дата поступления 16 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 12 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Калинин И.В., Кулагин В.А. Экспериментальное исследование теплообмена нагретых материалов при конвейерной транспортировке. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):543–552. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-543-552

## Experimental research of heated materials heat exchange at conveyor transportation

Ilya V. Kalinich, Vladimir A. Kulagin

*Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia*

**Abstract:** Experimental studies of heated materials with the surface temperature from 313 to 363 K transported by conveyors in production conditions were carried out in order to obtain the data required for the design of heating and ventilation systems of conveyor galleries. Experimental researches were conducted analytically on a laboratory test bench, which allowed to simulate actual conditions corresponding to production ones as accurately as possible. The factors influencing the heat exchange of heated materials with the temperature from 313 to 363K under conveyor transportation have been identified. Calculated dependences have been obtained for determining heat release from the surface of these materials. The data provided in the present work can be considered more reliable than the data of the authors of previous studies, since the studies carried out by the latter were conducted with the use of less advanced equipment which lacks the capacity of accurate simulation of actual production conditions. The empirical dependences that enable the determination of local and average coefficients of general and convective heat transfer at conveyor transportation of materials with the temperature from 313 to 363K have been received, and the heat flux coming from heated materials' surface calculation has been calculated. The obtained data are necessary when designing heating and ventilation systems for production rooms where conveyor transportation of heated materials with the temperature of surface from 313 to 363K is carried out.

**Keywords:** convection, coefficient of convective heat transfer, heat exchange, heat transfer

**Acknowledgements:** The reported study has been carried out with funding from the Russian Foundation for Basic Research and the Government of the Krasnoyarsk Territory in the framework of research projects no. 18-48-242001, 18-41-242004, 18-41-242008.

**Information about the article:** Received February 16, 2019; accepted for publication April 12, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Kalinich I.V., Kulagin V.A. Experimental research of heated materials heat exchange at conveyor transportation. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):543–552. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-543-552

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При проектировании систем отопления и вентиляции производственных помещений, в которых осуществляется конвейерная транспортировка нагретых материалов (с целью обеспечения в них нормируемых параметров внутренней воздушной среды), необходимы сведения о коэффициентах теплоотдачи от поверхности транспортируемых материалов. Эту информацию можно получить при проведении экспериментальных трудов, необходимых при проектировании систем отопления и вентиляции конвейерных галерей, в которых осуществляется транспортировка нагретых материалов, что и является целью исследования.

## 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В настоящей работе при проведении специальных исследований моделировались технологические параметры нагретых материалов, транспортируемых в конвейерных галереях горнообогатительных комбинатов (ГОК) черной металлургии. Многочисленные опыты теплообмена нагретых материалов при конвейерной транспортировке в галереях были проведены на экспериментальном стенде, схема которого приведена на рис. 1.

В данном эмпирическом стенде была принята схема регулирования температуры внутренней поверхности ограждений галереи, которая позволила произвести измерения конвективного и лучистого тепловых потоков, поступающих от поверхности материалов. Для того, чтобы исключить поступление теплового потока от нижней поверхности исследуемой цилиндрической полупластины и каркаса конвейера, добиваясь, таким образом, натурных условий, соответствующих технологическим условиям в кон-

вейерных галереях ГОКов черной металлургии, в данной установке использовалась система охлаждения каркаса конвейера. Вода, подававшаяся от распределительного устройства в секции конвейеров, производила охлаждение. Расход воды регулировался с помощью пережимных устройств и устанавливался таким образом, чтобы средняя температура струи, циркулирующей в секции конвейера, равнялась температуре воздуха под моделью конвейера в среднем сечении секции.

Проведенные экспериментальные исследования позволили определить следующие величины:

- расход воздуха, проходящего через галерею;
- температуру воздуха на входе и выходе из галереи;
- локальные температуры исследуемой поверхности цилиндрической полупластины.

Расход воздуха был определен по перепаду давлений в камере статического давления и коллекторе по известной методике, которая изложена в работе [1]. Давление измерялось микроманометром МКВ-250-0,02 с классом точности 0,02 и пределом измерений 0–250 кг/м<sup>2</sup>.

Температуры воздуха на входе и выходе из галереи измерялись термометрами с ценой деления 273,25 К и пределом измерений 273,15–325,15 К.

Локальные температуры поверхности исследуемой теплоотдающей цилиндрической полупластины измерялись термопарами, которые были установлены в семи сечениях пластины, по три в каждом сечении. В качестве регистрирующих приборов были использованы потенциометры КСП-4 с классом точности 0,25; пределами измерений 273,15–373,15 К и 273,15–873,15 К.

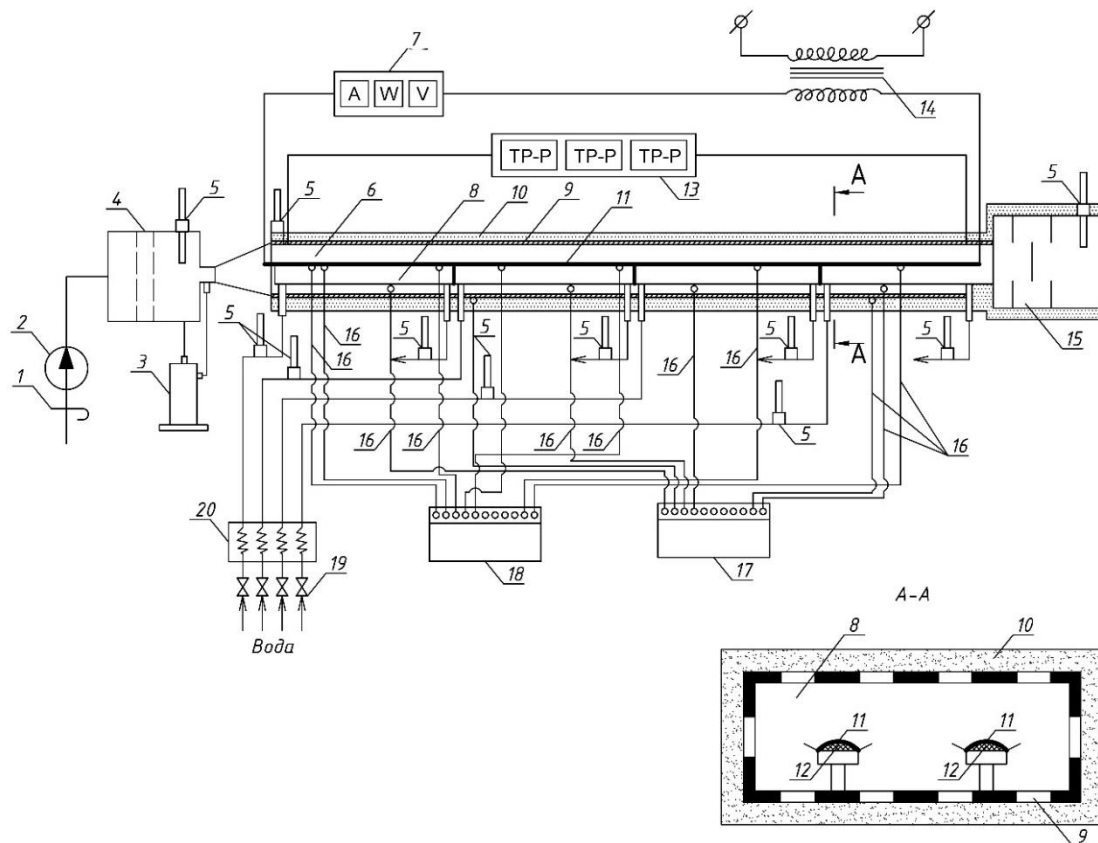


Рис. 1. Схема экспериментального стенда для исследования теплообмена нагретых материалов: 1 – регулирующая заслонка; 2 – вентилятор; 3 – микроманометр МКВ-250-0,02; 4 – камера давления с коллектором; 5 – термометр ТМ-1; 6 – модель галереи; 7 – электроизмерительный комплект; 8 – модель конвейера; 9 – обогреваемые ограждения; 10 – пенопластовая теплоизоляция; 11 – исследуемая теплоотдающая цилиндрическая полупластина; 12 – асбестовая теплоизоляция; 13 – трансформатор АОМН 40-220; 14 – силовой трансформатор РНО-220-40; 15 – камера смешивания; 16 – термопара ТПК-011; 17 – потенциометр ЭПП-09; 18 – потенциометр КСП-4; 19 – регулятор расхода воды; 20 – термостат ТС-24

Fig. 1. Diagram of the experimental test bench for the research of heat exchange of heated materials: 1 – control valve; 2 – ventilator; 3 – micromanometer MKV-250-0,02; 4 – pressure chamber with a collector; 5 – thermometer TM-1; 6 – model of a gallery; 7 – electrical measuring set; 8 – model of a conveyor; 9 – heated wallings; 10 – foam plastic insulation; 11 – tested heat-release cylindrical half-plate; 12 – asbestos insulation; 13 – transformer AOMI 40-220; 14 – power transformer RNO-220-40; 15 – mixing chamber; 16 – thermocouple TPK-011; 17 – potentiometer EPP-09; 18 – potentiometer KSP-4; 19 – water flow controller; 20 – thermostat TS-24

Для каждого из режимов были найдены следующие величины [2]:

1. Локальные числа Нуссельта и Рейнольдса в рассматриваемом сечении цилиндрической пластины

$$Nu_x = \frac{\alpha_{\text{кx}} \cdot x}{\lambda_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

где  $\alpha_{\text{кx}}$  – локальный коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $x$  – расстояние до рассматриваемого сечения модели галереи, м;  $\lambda_{\text{вх}}$  – коэффициент кинематиче-

ской вязкости воздуха, подсчитанный по его средней температуре в изучаемом сечении модели галереи, м<sup>2</sup>/с.

$$Re_x = \frac{v_{\text{кx}} \cdot x}{v_{\text{вх}}}, \quad (2)$$

где  $v_{\text{вх}}$  – скорость воздуха, подсчитанная по его средней температуре в исследуемом сечении модели галереи, м/с;  $v_{\text{кx}}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, выведенный по его средней температуре в представленном сечении модели галереи, м<sup>2</sup>/с.

2. Средние числа Нуссельта, Рейнольдса и Грасгофа для всей исследуемой теплоотдающей поверхности цилиндрической полупластины:

$$Nu_{\kappa} = \frac{\alpha_{\kappa} \cdot l}{\lambda_{\kappa}}, \quad (3)$$

где  $\alpha_{\kappa}$  – средний коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $l$  – длина исследуемой теплоотдающей цилиндрической полупластины, м;  $\lambda_{\kappa}$  – теплопроводность воздуха при среднеобъемной температуре воздуха в модели галереи, Вт/(м·К).

$$Re_{\kappa} = \frac{v_{\kappa} \cdot l}{\nu_{\kappa}}, \quad (4)$$

где  $v_{\kappa}$  – скорость воздуха, определенная по его среднеобъемной температуре в модели галереи, м/с;  $\nu_{\kappa}$  – коэффициент кинематической вязкости воздуха, определенный по его среднеобъемной температуре в модели галереи, м<sup>2</sup>/с.

$$Gr_{\kappa} = \frac{g \cdot \beta \cdot l^3 \cdot \Delta T}{\nu_{\kappa}^2}, \quad (5)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\Delta T$  – разница среднеинтегральной температуры поверхности исследуемой теплоотдающей пластины ( $\bar{T}_c$ ) и среднеобъемной температуры воздуха в модели галереи ( $\bar{T}_g$ ), К;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения, 1/К, определяемый как

$$\beta = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{\Delta \rho}{\Delta T}, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>.

Локальные коэффициенты конвективной теплоотдачи определялись по следующей формуле:

$$\alpha_{\kappa x} = \frac{q_{\kappa}}{T_c - T_g}, \quad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}, \quad (7)$$

где  $q_{\kappa}$  – удельный конвективный тепловой поток, Вт/м<sup>2</sup>;  $T_c$  – локальная температура исследуемой теплоотдающей цилиндрической полупластины, К;  $T_g$  – средняя по сечению модели галереи температура воздуха, определявшаяся расчетом по измеренным значениям его температуры на входе и выходе из модели галереи с учетом линейного закона распределения по длине галереи, К.

Средние коэффициенты конвективной теплоотдачи исследуемой теплоотдающей цилиндрической полупластины определялись по формуле:

$$\alpha_{\kappa} = \frac{q_{\kappa}}{T_c - T_g}, \quad \text{Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}. \quad (8)$$

Удельный конвективный тепловой поток определялся по методу энтальпии [3]:

$$q_{\kappa} = \frac{c_g \cdot G_g \cdot (T_g'' - T_g')}{F_c}, \quad \text{Вт/м}^2, \quad (9)$$

где  $c_g$  – удельная теплоемкость воздуха, рассчитанная по среднеобъемной температуре воздуха, Дж/(кг·К);  $G_g$  – масса воздуха, рассчитанная по среднеобъемной температуре воздуха, кг/с;  $T_g'$  – температура воздуха на входе в галерею, К;  $T_g''$  – температура воздуха на выходе из галереи, К;  $F_c$  – площадь поверхности исследуемой теплоотдающей цилиндрической полупластины, м<sup>2</sup>.

Для исследования локальных и средних коэффициентов конвективной теплоотдачи было проведено 114 опытов. По результатам опытов был выполнен расчет средних коэффициентов конвективной теплоотдачи при следующих изменениях: числа Рейнольдса от  $8,7 \cdot 10^5$  до  $43 \cdot 10^5$  и углах наклона галереи 0 и 30° [4].

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Локальные коэффициенты в каждом из опытов были рассчитаны в семи сечениях пластины на следующих расстояниях от

входа: 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 0,75; 1,25; 1,75 м. При этом в каждом сечении локальный коэффициент конвективной теплоотдачи был определен в трех точках пластины, после чего проводилось его усреднение по сечению. Локальные и средние коэффициенты конвективной теплоотдачи были рассчитаны по формулам (7) и (8). Результаты расчета приведены на рис. 2.

На рис. 2 также представлены результаты экспериментальных исследований локальных коэффициентов конвективной теплоотдачи от поверхности теплоотдающей цилиндрической полупластины. Обработка методом наименьших квадратов позволила получить эмпирическую зависимость для расчета локальных коэффициентов конвективной теплоотдачи при конвейерной транспортировке нагретых материалов в галереях:

$$Nu_{\kappa\kappa} = 0,056 \cdot Re_x^{0,79}. \quad (10)$$

Данное уравнение справедливо при

$\bar{T}_c = 313\text{--}363$  К в диапазоне чисел  $Re_x = (0,2\text{--}30) \cdot 10^5$  и чисел  $Gr_x = (2\text{--}5,4) \cdot 10^{10}$ . В уравнении (10) за определяющий размер принята текущая координата  $x$ , отсчитываемая от начала исследуемой полупластины за определяющую температуру –  $T_\theta$ . Скорость воздуха подсчитывалась по сечению модели галереи при температуре  $T_\theta$ . Влияние угла наклона модели на конвективный теплообмен показано на рис. 3.

Анализ данных (представленных на рис. 3) показывает, что с увеличением угла наклона модели до  $30^\circ$  теплообмен уменьшается. Уменьшение теплообмена составляет 6–8%, что находится в пределах точности экспериментальных исследований. Следовательно, влиянием угла наклона модели на конвективный теплообмен в нашем случае можно пренебречь. На рис. 4 представлены опытные данные по конвективному теплообмену в виде следующей зависимости:  $Nu_\kappa = f(Re, Gr, \theta)$ .

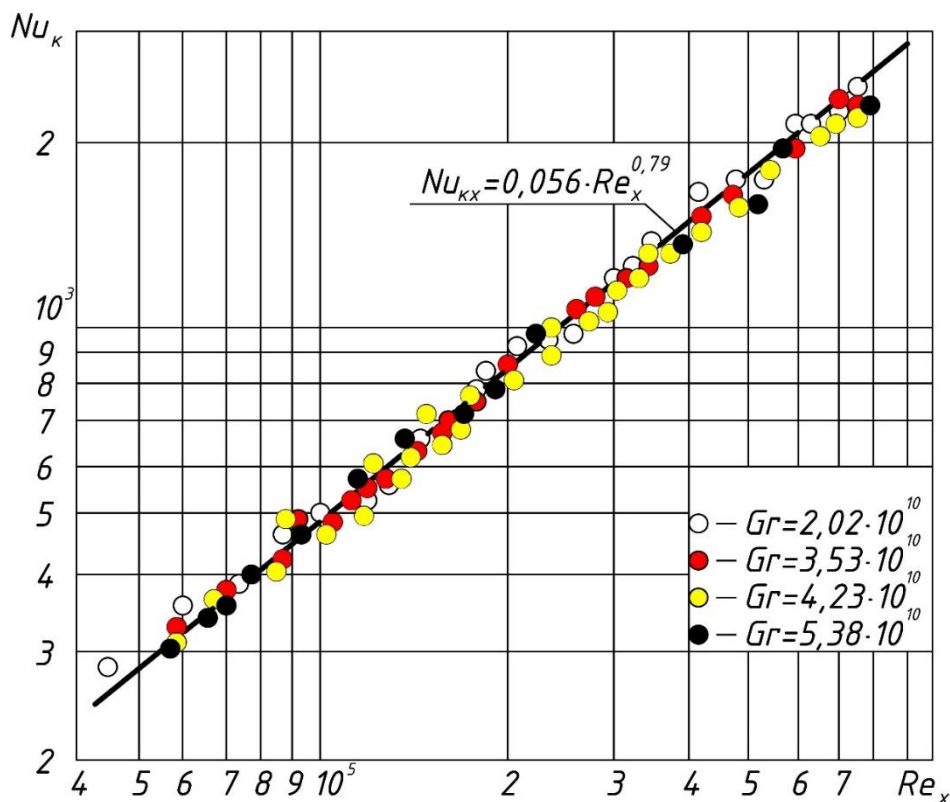


Рис. 2. Обобщенная зависимость локальных коэффициентов конвективной теплоотдачи  
Fig. 2. Generalized dependence of local convective heat transfer coefficients

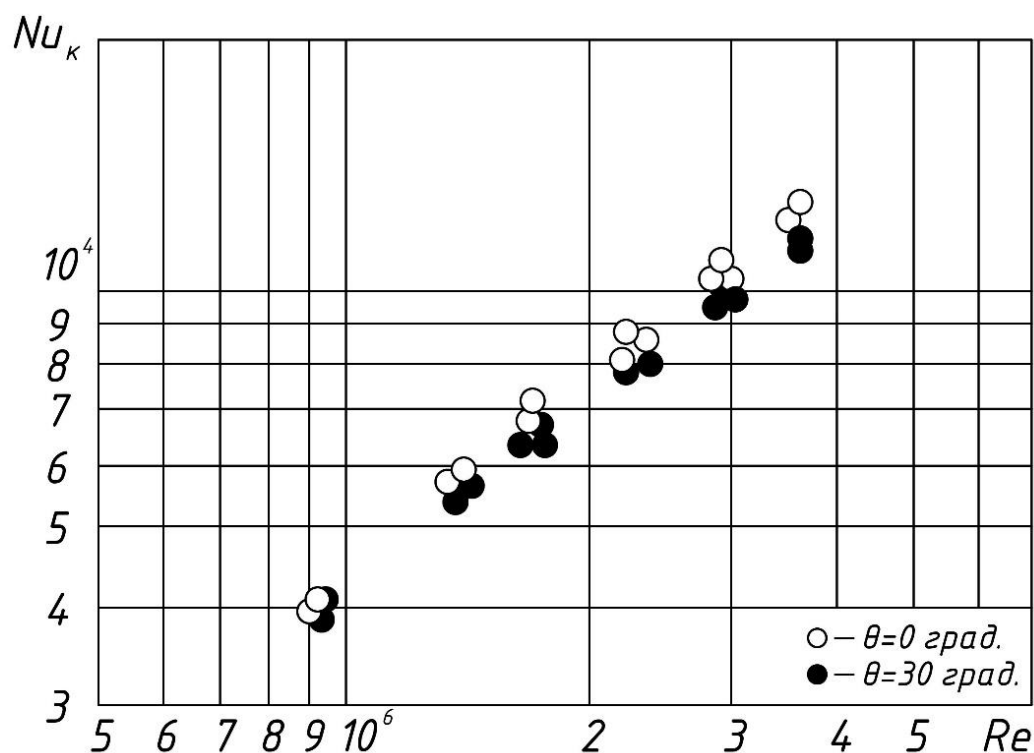


Рис. 3. Влияние угла наклона галереи на конвективный теплообмен  
 Fig. 3. Influence of the gallery tilt angle on convective heat exchange

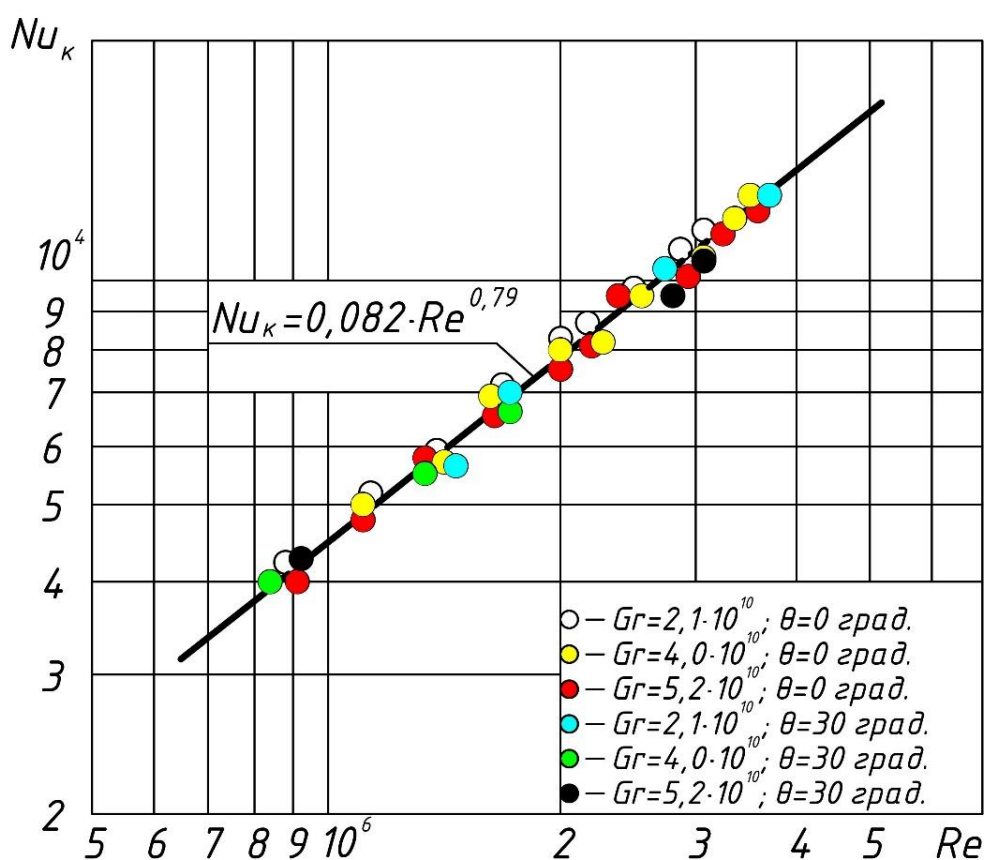


Рис. 4. Обобщенная зависимость средних коэффициентов конвективного теплообмена  
 Fig. 4. Generalized dependence of average convective heat transfer coefficients



Анализ приведенных данных показывает, что в указанном диапазоне чисел Рейнольдса и Грасгофа влияние естественной конвекции на теплообмен незначительно, что согласуется с итоговыми результатами, приведенными в работе [5]. Опытные данные, полученные для средних коэффициентов конвективного теплообмена, обобщены следующей критериальной зависимостью:

$$Nu_{\kappa} = 0,082 \cdot Re^{0,79}. \quad (11)$$

Данная зависимость справедлива в диапазонах указанных изменений:  $Re = (9 - 35) \cdot 10^5$ ;  $Gr = (2,1 - 5,2) \cdot 10^{10}$  при  $T_c = 313 - 363$  К;  $\theta = 0 - 30^\circ$ . В уравнении (11) за определяющий размер принята длина исследуемой полупластины –  $l$ , за определяющую температуру –  $\overline{T}_g$ . Скорость воздуха подсчитывалась по среднему сечению модели галереи.

Сравнивая результаты экспериментальных исследований настоящей работы с ранее выполненными исследованиями [6–8], можно сделать вывод, что интенсивность теплообмена в проведенных опытах на 40–50% меньше. Это объясняется тем, что в работах [6–8] исследования теплообмена проводились на одинаковых по конструкции установках, в которых нагревательные элементы (имитирующие транспортируемый материал), изготавливались из двух сложенных асбоцементных пластин, между которыми укладывалась нихромовая проволока. Вследствие этого теплоотдача в воздух галереи происходила как с верхней, так и с нижней поверхностей пластин, а при расчете коэффициента теплоотдачи весь тепловой поток относился только к верхней поверхности пластины. Следовательно, были получены завышенные коэффициенты теплоотдачи. Кроме того, воздух в модель галереи подавался плоской настилающейся на перекрытие струей, из-за чего нарушалось моделирование на начальном участке. Та-

ким образом, полученные в наших исследованиях данные можно считать более полно отражающими процесс теплообмена материалов при конвейерной транспортировке в галереях.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований установлено:

1) при конвейерной транспортировке нагретых материалов с температурой 313–363 К естественная конвекция и угол наклона галереи влияют на конвективный теплообмен незначительно;

2) произведенные эмпирические зависимости (10) и (11) позволяют определить локальные и средние коэффициенты общей и конвективной теплоотдачи при конвейерной транспортировке материалов с температурой 313–363 К и рассчитать тепловой поток, поступающий от поверхности этих материалов.

Полученные в настоящей работе выверенные значения необходимы при проектировании систем отопления и вентиляции конвейерных галерей, в которых осуществляется транспортировка нагретых материалов с температурой поверхности от 313 до 363 К.

Точный расчет данных инженерных систем обуславливает их эффективное функционирование, обеспечивающее нормируемые параметры воздушной среды в помещениях конвейерных галерей, а также позволяет рационально и более экономично использовать энергоресурсы на технологические нужды за счет экономии теплоты на нагревание приточного воздуха, а также экономии электроэнергии на транспортировку и его очистку<sup>1</sup> [9–15].

Таким образом, существует народнохозяйственная проблема повышения точности проектирования, эксплуатации, управления и контроля технологией транспортирования нагретых влажных продуктов, ре-

<sup>1</sup>АВОК 1-2004. Влажный воздух: справ. пособие. М.: АВОК-Пресс, 2004. / AVOK 1-2004. Humid air: reference book. Moscow: AVOK-Press Publ., 2004.

шение которой позволит экономить топливные ресурсы и снизить вредные выбросы в атмосферу.

Современные требования к тепло-технологиям, широкое внедрение процессорных методов измерения, контроля и управления ставят в число приоритетных задач более детальную разработку физико-математических моделей гидродинамических, тепломассообменных и термодинами-

ческих процессов [15–25]. В случае математического моделирования этих явлений и реализации их численными или аналитическими методами получаемые результаты обладают большей общностью и удобством для практического использования. Успешное решение названной задачи определяет реальные возможности повышения технического уровня и эффективности эксплуатации технических систем.

### **Библиографический список**

1. Посохин В.Н. Аэродинамика вентиляции. М.: АВОК-Пресс, 2008. 208 с.
2. Романов С.В., Зиганшин А.М., Посохин В.Н. Численное исследование конвекции над объемным протяженным теплоисточником // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 8 (584). С. 111–115.
3. Мошкин Д.И., Коробков С.В. Расчет локального коэффициента конвективной теплоотдачи с помощью программы ЭВМ // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. 2014. № 13. С. 216–223.
4. Мошкин Д.И. Описание технологических параметров, влияющих на коэффициент теплоотдачи // Современная наука: теоретический и практический взгляд: сб. статей Междунар. науч.-практ. конф. (г. Уфа, 15 октября 2014 г.). Уфа, 2014. С. 42–46.
5. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1981. 416 с.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Атомиздат, 1979. 416 с.
7. Маринченко В.М. Внешний тепло- и массообмен при конвейерной транспортировке зернистых материалов // Механика сыпучих материалов: тезисы докладов III Всесоюзной конф. (г. Одесса, 17 июня 1975 г.). Одесса, 1975. С. 271–272.
8. Смольников Г.В. К расчету отопления и вентиляции галерей паровыделяющих материалов агломерационных фабрик горно-обогатительных комбинатов // Физико-технические проблемы управления воздухообменом в горных выработках больших объемов: тезисы докладов Всесоюзного науч.-техн. симпозиума (г. Ленинград, 1 апреля 1983 г.). Ленинград, 1983. С. 167–169.
9. Караджи В.Г., Московко Ю.Г. Вентиляционное оборудование. Технические рекомендации для проектировщиков и монтажников. М.: АВОК-Пресс, 2010. 432 с.
10. Стефанов Е.В. Вентиляция и кондиционирование воздуха. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2005.
11. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1973.
12. Болгарский А.В., Мухачев Г.А., Щукин В.К. Термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1975. 383 с.
13. Батурин В.В. Основы промышленной вентиляции. 4-е изд. М.: Профиздат, 1990. 448 с.
14. Кокорин О.Я. Отечественное оборудование для создания систем вентиляции и кондиционирования воздуха. М.: Изд-во физико-математической литературы, 2003. 272 с.
15. Гримитлин М.И. Распределение воздуха в помещениях. СПб.: АВОК Северо-Запад, 2004. 337 с.
16. Баранова М.П., Кулагина Л.В., Екатеринбург В.М. Физико-химические основы промышленных тепло-технологий. Красноярск: Изд-во Гротеск, 2018. 160 с.
17. Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И., Ли Фенд-Чен. Тепломассообмен и суперкавитация. Новосибирск: Наука, 2015. 436 с.
18. Демиденко Н.Д., Кулагин В.А., Шокин Ю.И. Моделирование и вычислительные технологии распределенных систем. Новосибирск: Наука, 2012. 424 с.
19. Moutsoglou A. Estimation of boundary heat flux using experimental temperature data in turbulent forced convection flow. Heat and mass Transfer, 2014, vol. 51(3), pp. 411–421. DOI: 10.1007/s00231-014-1421-2
20. Moutsoglou A., Park M.R. Natural convection heat transfer in a three-dimensional duct. J of Thermophysics and Heat Transfer, 1993, vol. 7(2), pp. 369–376. DOI: 10.2514/3.429
21. Moutsoglou A., Wong Y.H. Convection-radiation interaction in buoyancy-induced channel flow. J of Thermophysics and Heat Transfer, 1989, vol. 3(2), pp. 175–181. DOI: 10.2514/3.145
22. Moutsoglou A. Solution of an elliptic inverse convection problem using a whole domain regularization technique. AIAA. J Thermophysical Heat Transfer, 1990, vol. 4(3), pp. 341–349.
23. Park H.M., Lee Feng-Chen. A method of solving inverse convection problems by means of mode reduction. Chem Eng Sci, 1998, vol. 53(9), pp. 1731–1744.
24. Parwani A.K., Talukdar P. Subbarao PMV. A hybrid approach using CGM and DE algorithm for estimation of boundary heat flux in a parallel plate channel. Numer Heat Transfer, 2014, vol. 65, part. A, pp. 461–481.
25. Parwani A.K., Talukdar P. PMV Subbarao. Estimation of boundary heat flux using experimental temperature data in turbulent forced convection flow. Heat Mass Transfer, 2015, vol. 51, pp. 411–421. DOI 10.1007/s00231-014-1421-2



## References

1. Posohin V.N. *Aerodinamika ventilyacii* [Aerodynamics of ventilation]. Moscow: AVOK-Press Publ., 2008, 208 p. (In Russ.).
2. Romanov S.V., Ziganshin A.M., Posohin V.N. Numerical study of convection over a volumetric extended heat source. *Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2007, no. 8 (584), pp. 111–115. (In Russ.).
3. Moshkin D.I., Korobkov S.V. Calculation of the local coefficient of convective heat transfer using a computer program. *Fundamental'nye i prikladnye issledovaniya: problemy i rezul'taty* [Fundamental and Applied Researches: Problems and Results], 2014, no. 13, pp. 216–223. (In Russ.).
4. Moshkin D.I. *Opisanie tekhnologicheskikh parametrov, vliyayushchih na koefitsient teplootdachi* [Description of technological parameters influencing the coefficient of heat transfer]. *Sbornik statej Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii "Sovremennaya nauka: teoreticheskij i prakticheskij vzglyad"* [Collection of articles of International scientific and practical conference "Modern Science: theoretical and practical view", Ufa, 15 October 2014, pp. 42–46. (In Russ.).
5. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energiya Publ., 1981, 416 p. (In Russ.).
6. Kutateladze S.S. *Osnovy teorii teploobmena* [Fundamentals of the heat transfer theory]. Moscow: Atomizdat Publ., 1979, 416 p. (In Russ.).
7. Marinchenko V.M. *Vneshnij teplo- i massoobmen pri konvejernoj transportirovke zernistyh materialov* [External heat and mass transfer at conveyor transportation of granular materials]. *Tezisy dokladov III Vsesoyuznoj konferencii "Mekhanika sypuchih materialov"* [Abstracts of the III All-Union Conference "Mechanics of bulk materials"], Odessa, 17 June 1975], Odessa, 1975, pp. 271–272. (In Russ.).
8. Smol'nikov G.V. *K raschyotu otopleniya i ventilyacii galerej parovydyel'nykh materialov aglomeracionnykh fabrik gorno-obogatitel'nykh kombinatov* [To calculation of heating and ventilation of galleries of steam generating materials of sintering plants of mining and processing factories]. *Tezisy dokladov Vsesoyuznogo nauchno-tekhnicheskogo simpoziuma "Fiziko-tekhnicheskie problemy upravleniya vozduhoobmenom v gornyh vyrabotkah bol'shih ob'yemov"* [Abstracts of the All-Union Scientific and Technical Symposium "Physicotechnical problems of air exchange control in high-volume mine workings", Leningrad, 1 April 1983]. Leningrad, 1983, pp. 167–169. (In Russ.).
9. Karadzhi V.G., Moskovko Yu.G. *Ventilyacionnoe oborudovanie. Tekhnicheskie rekomendacii dlya projektirovshchikov i montazhnikov* [Ventilation equipment. Technical recommendations for designers and installers]. Moscow: AVOK-Press Publ., 2010, 432 p. (In Russ.).
10. Stefanov E.V. *Ventilyatsiya i konditsionirovaniye vozdukh* [Ventilation and air conditioning]. Saint-Petersburg: AVOK North-West Publ., 2005. (In Russ.).
11. Mikheev M.A., Mikheeva I.M. *Osnovy teploperedachi* [Basics of heat transfer]. Moscow: Energiya Publ., 1973. (In Russ.).
12. Bulgarian A.V., Mukhachev G.A., Schukin V.K. *Termodinamika i teploperedacha* [Thermodynamics and heat transfer]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1975, 383 p. (In Russ.).
13. Baturin V.V. *Osnovy promyshlennoj ventilyacii* [Basics of industrial ventilation]. Moscow: Profizdat Publ., 1990, 448 p. (In Russ.).
14. Kokorin O.Ya. *Otechestvennoe oborudovanie dlya sozdaniya sistem ventilyacii i kondicionirovaniya vozduha* [Domestic equipment for creation of ventilation and air conditioning systems]. Publishing house of physical and mathematical literature, 2003, 272 p. (In Russ.).
15. Grimitlin M.I. *Raspredelenie vozduha v pomeshcheniyah* [Indoor air distribution]. Saint-Petersburg: ABOK North-West Publ., 2004, 337 p. (In Russ.).
16. Baranova M.P., Kulagina L.V., Ekaterinchev V.M. *Fiziko-himicheskie osnovy promyshlennyykh teplootekhnologij* [Physical and chemical bases of industrial heat technologies]. Krasnoyarsk: Grotesk Publishing House, 2018, 160 p. (In Russ.).
17. Demidenko N.D., Kulagin V.A., Shokin Yu.I., Lee Feng-Chen. *Teplomassoobmen i superkavitatsiya* [Heat and mass transfer and supercavitation]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2015, 436 p. (In Russ.).
18. Demidenko ND, Kulagin V.A., Shokin Yu.I. *Modelirovanie i vychislitel'nye tekhnologii raspredelennykh sistem* [Modeling and computing technologies of distributed systems]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2012, 424 p. (In Russ.).
19. Moutsoglou A. Estimation of boundary heat flux using experimental temperature data in turbulent forced convection flow. *Heat and mass Transfer*, 2014, vol. 51(3), pp. 411–421. DOI: 10.1007/s00231-014-1421-2
20. Moutsoglou A., Park M.R. Natural convection heat transfer in a three-dimensional duct. *J of Thermophysics and Heat Transfer*, 1993, vol. 7(2), pp. 369–376. DOI: 10.2514/3.429
21. Moutsoglou A., Wong Y.H. Convection-radiation interaction in buoyancy-induced channel flow. *J of Thermophysics and Heat Transfer*, 1989, vol. 3(2), pp. 175–181. DOI: 10.2514/3.145
22. Moutsoglou A. Solution of an elliptic inverse convection problem using a whole domain regularization technique. *AIAA. J Thermophysical Heat Transfer*, 1990, vol. 4(3), pp. 341–349.
23. Park H.M., Lee Feng-Chen. A method of solving inverse convection problems by means of mode reduction. *Chem Eng Sci*, 1998, vol. 53(9), pp. 1731–1744.
24. Parwani A.K., Talukdar P. Subbarao PMV. A hybrid approach using CGM and DE algorithm for estimation of boundary heat flux in a parallel plate channel. *Numer Heat Transfer*, 2014, vol. 65, part. A, pp. 461–481.
25. Parwani A.K., Talukdar P. PMV Subbarao. Estimation of boundary heat flux using experimental temperature data in turbulent forced convection flow. *Heat Mass Transfer*, 2015, vol. 51, pp. 411–421. DOI 10.1007/s00231-014-1421-2

#### **Критерии авторства**

Калинин И.В., Кулагин В.А. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Калинин Илья Викторович,**  
ассистент кафедры инженерной экологии  
и безопасности жизнедеятельности,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79, Россия,  
e-mail: il-k@mail.ru

**Кулагин Владимир Алексеевич,**  
доктор технических наук,  
профессор кафедры теплотехники  
и гидрогазодинамики,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, просп. Свободный, 79, Россия,  
e-mail: vkulagin@sfu-kras.ru

#### **Authorship criteria**

Kalinich I.V., Kulagin V.A. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Ilya V. Kalinich,**  
Assistant Professor of the Department  
of Environmental Engineering and Life Safety,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia,  
e-mail: il-k@mail.ru

**Vladimir A. Kulagin,**  
Dr. Sci. (Eng.),  
Professor of the Department  
of Heat Engineering and Gas Dynamics,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny pr., Krasnoyarsk 660041, Russia,  
e-mail: vkulagin@sfu-kras.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 001+376:004

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-553-574>

## Разработка и исследование математических моделей трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов

© М.А. Новожилов, В.А. Пионкевич

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

**Резюме:** Цель исследования – разработка и исследование трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов. Для достижения цели использовались методы имитационного моделирования в среде SimPowerSystems/Simulink комплекса MATLAB. Предложены модели неуправляемого и управляемого трехфазного мостового выпрямителя, а также инверторов: автономного мостового, автономного со стабилизированным напряжением, трехфазного мостового (ведомого сетью в среде SimPowerSystems/Simulink комплекса MATLAB). Проведенные исследования на разработанных моделях показали корректность использования математического аппарата и принципов управления полупроводниковыми приборами. Разработанные модели могут применяться для проведения исследований систем электроснабжения, содержащих источники возобновляемой энергии (как солнечные батареи), которые могут использоваться совместно с накопителями электрической энергии, требующими наличия инверторных и выпрямительных устройств для их соединения с электрической сетью.

**Ключевые слова:** неуправляемый трехфазный мостовой выпрямитель, управляемый трехфазный мостовой выпрямитель, автономный мостовой инвертор, автономный инвертор со стабилизированным напряжением, трехфазный мостовой инвертор, ведомый сетью

**Информация о статье:** Дата поступления 26 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 9 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Новожилов М.А., Пионкевич В.А. Разработка и исследование математических моделей трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):553–574. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-553-574

## Development and study of mathematical models of three-phase bridge rectifiers and inverters

Mikhail A. Novozhilov, Vladimir A. Pionkevich

*Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the work is development and study of three-phase bridge rectifiers and inverters. It is achieved through the use of simulation methods in SimPowerSystems/Simulink of MATLAB. The article proposes the models of an uncontrolled and controlled three-phase bridge rectifier, an autonomous bridge inverter, an autonomous inverter with stabilized voltage, a network driven three-phase bridge inverter in SimPowerSystems/Simulink of MATLAB. The research conducted on the developed models has shown the correctness of the use of mathematical apparatus and semiconductor device control principles. The developed models can find application in the studies of power supply systems containing renewable energy sources (such as solar cells), which can be used together with electrical energy storage devices requiring inverters and rectifiers to be connected to the electrical network.

**Keywords:** uncontrolled three-phase bridge rectifier, controlled three-phase bridge rectifier, autonomous bridge inverter, autonomous inverter with stabilized voltage, network driven three-phase bridge inverter

**Information about the article:** Received February 26, 2019; accepted for publication April 9, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Novozhilov M.A., Pionkevich V.A. Development and study of mathematical models of three-phase bridge rectifiers and inverters. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):553–574. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-553-574

## 1 ВВЕДЕНИЕ

Мостовые выпрямительные схемы получили широкое распространение в различных областях промышленности: энергетике; электролизных и гальвано-пластических отраслях; металлургии; сварочных технологиях, где они выступают в качестве основных силовых устройств в технологических процессах или источниках питания, системах регулирования, автоматики [1].

Имеет место стремительный прогресс в развитии электронных приборов: от селеновых выпрямителей, использовавшихся в источниках питания небольшой мощности и газоразрядных (ионных) приборов (кенотронов, ртутных вентилей) – до кремниевых электронных приборов (транзисторов, тиристоров) и современных быстродействующих электронных приборов (GTO, IGBT, MOSFET), тиристоров, интегральных схем [1].

В работе рассматриваются трехфазные мостовые схемы, содержащие шесть вентилей, которые называют еще схемой Ларионова по фамилии автора, впервые ее предложившую. Она получила наибольшее распространение, поскольку имеет лучшие технические характеристики по сравнению,

например, с трехфазной трехвентильной схемой или схемой с нулевой точкой.

Актуальность создания математических моделей инверторов обусловлена необходимостью изучения их поведения в составе возобновляемых источников энергии, таких как солнечные батареи [2–5] и ветроэнергетические установки (ВЭУ) [6–9], которые на практике используются совместно с накопителями электрической энергии. На основе разработанных математических моделей можно выполнить анализ показателей качества электрической энергии, аварийных и ненормальных режимов работы в системах электроснабжения, содержащих асинхронные генераторы (АГ) [10]. Также разработанные модели трехфазных мостовых выпрямителей и инверторов можно использовать при выполнении исследований регуляторов напряжения АГ с учетом различного характера нагрузки [11] вида первичного двигателя, а также при исследованиях параллельной работы нескольких АГ на общую нагрузку [12].

Изображения на схемах современных электронных приборов в системе MATLAB приведены на рис. 1 [13].

Мостовые схемы с использованием этих приборов приведены на рис. 2, 3 [1, 13].

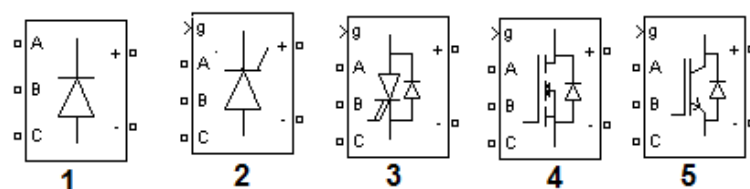


Рис. 1. Типы современных полупроводниковых приборов в системе MATLAB:  
 1 – диод; 2 – тиристор; 3 – GTO-тиристор; 4, 5 – IGBT-, MOSFET-транзисторы  
 Fig. 1. Types of modern semiconductor devices in MATLAB:  
 1 – diode; 2 – thyristor; 3 – GTO-thyristor; 4, 5 – IGBT-, MOSFET-transistors

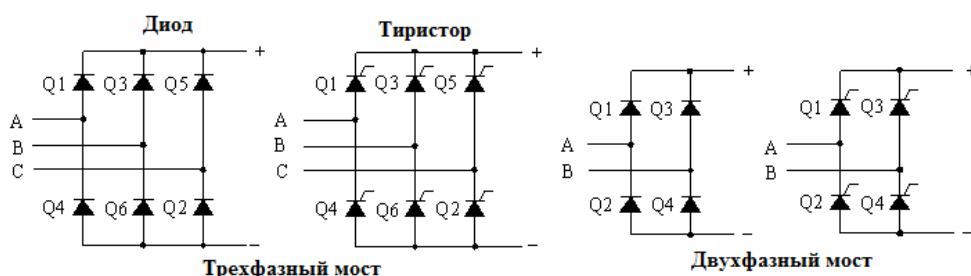


Рис. 2. Трёхфазные и двухфазные мостовые схемы выпрямления  
 Fig. 2. Three-phase and two-phase bridge rectification circuits

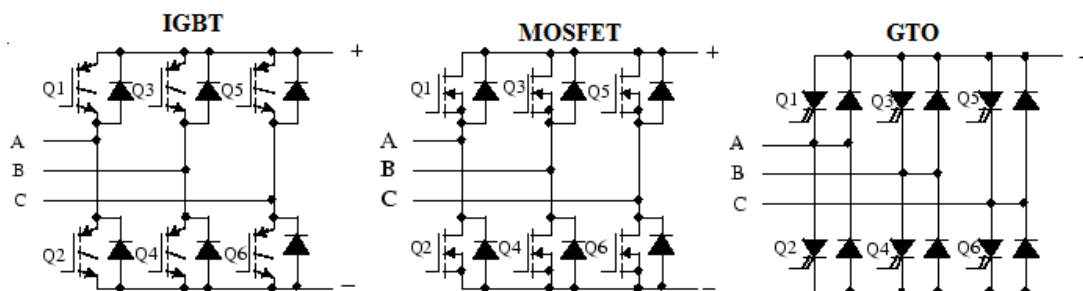


Рис. 3. Мостовые схемы с быстродействующими электронными приборами  
Fig. 3. Bridge circuits with high-speed electronic devices

Двухфазная мостовая схема может быть использована и с другими электронными приборами.

## 2. НЕУПРАВЛЯЕМЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ МОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

В трехфазной мостовой схеме катоды вентилей  $w_1, w_3, w_5$  объединены в общий (положительный) вывод выпрямителя и образуют нечетную (катодную) группу. Аноды вентилей  $w_4, w_6, w_2$  объединены в общий (отрицательный) вывод и образуют четную (анодную) группу моста [1].

Рассмотрим работу трехфазной мостовой схемы выпрямления с неуправляемыми вентилями с помощью SPS-модели, приведенной на рис. 4 [13, 14].

Выпрямитель питается от трехфазного источника через трансформатор мощностью 630 кВА, напряжением 10 кВ, с трансформацией на 0,4 кВ. Нагрузка выпрямителя активно-индуктивная.

Осциллограммы работы выпрямителя приведены на рис. 5.

В любой момент (исключая время коммутации) в схеме работают (пропускают ток) два вентиля – один из четной и другой из нечетной групп. Коммутация (переключение вентилей) происходит в моменты времени, соответствующие изменению угла на  $\pi/3$  ( $60^\circ$  эл.).

Чередование работы отдельных вентилей легко прослеживается на рис. 5 в осциллограмме  $l_{abc}$ . Период переменного тока от 0,105 до 0,125 с соответствует  $360^\circ$  и разбит на участки по  $60^\circ$  и  $120^\circ$ . Из осциллограммы  $l_{abc}$  видно, что вентили нечетной группы срабатывают в последовательности 1, 3, 5, а четной – 2, 4, 6. Все вентили открыты в течение  $1/3$  периода, т.е. на  $60^\circ$  эл. (без учета времени на коммутацию).

Проследим этот процесс на примере переключения тока вентилями нечетной группы  $w_1$  и  $w_3$ .

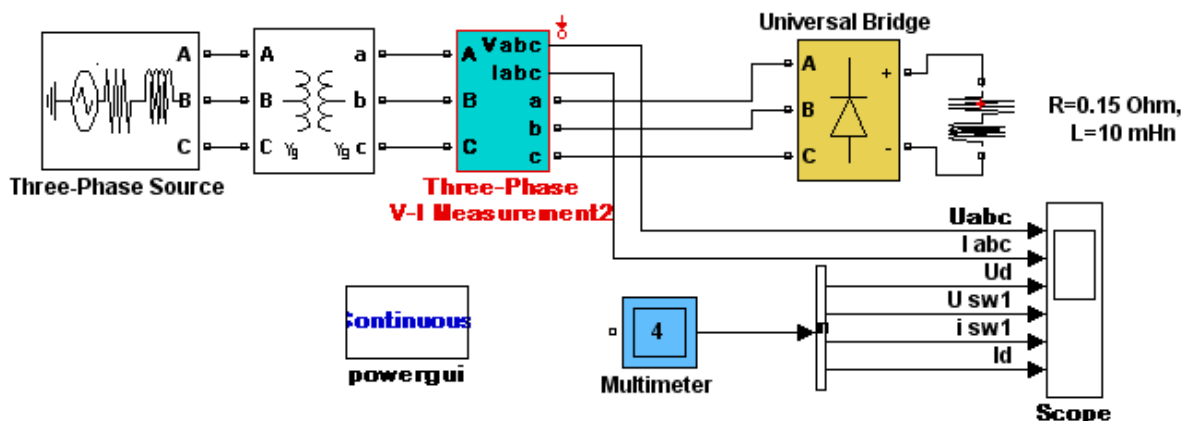
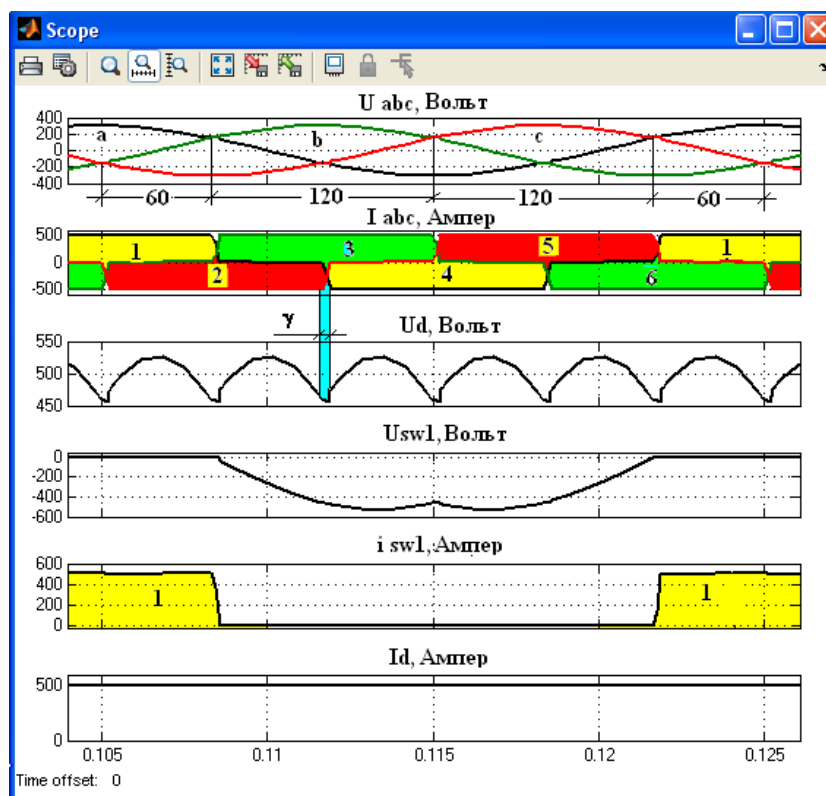


Рис. 4. MATLAB-модель неуправляемого выпрямителя (файл Garmonic\_9\_1)  
Fig. 4. MATLAB-model of uncontrolled rectifier (file Garmonic\_9\_1)



**Рис. 5. Осциллограммы трехфазного мостового диодного выпрямителя:**  
*Uabc* – напряжение питающей сети; *iabc* – трехфазный ток в сети; *Ud* – выпрямленное напряжение;  
*Usw1* – напряжение на первом диоде; *i sw1* – ток первого диода; *Id* – выпрямленный ток моста;  
 $\gamma$  – угол коммутации

**Fig. 5. Waveforms of three-phase diode bridge rectifier:** *Uabc* – supply voltage; *iabc* – three-phase current in the network; *Ud* – rectified voltage; *Usw1* – voltage of the first diode; *i sw1* – current of the first diode; *Id* – the rectified current of the bridge;  $\gamma$  – commutation angle

Аноды вентилях *w1* и *w3* подключены, соответственно, к фазам *a* и *b* вторичной обмотки трансформатора. Как следует из рис. 5 (начальная часть осциллограммы *Uabc*), напряжение фазы *a* больше напряжения фазы *b*, и анодное напряжение вентиля *w1* больше анодного напряжения вентиля *w3*, следовательно, вентиль *w1* открыт, а вентиль *w3* закрыт. При сравнении напряжений фаз начинается процесс коммутации и после того, как анодное напряжение вентиля *w3* станет больше анодного напряжения вентиля *w1*, вентиль *w3* откроется, а вентиль *w1* закроется.

Аналогично протекает коммутация четных вентилях, но сравниваются напряжения двух фаз отрицательной полярности на их катодах.

Кривая выпрямленного напряжения определяется разностью фазных напряжений, работающих в данной части периода

вторичных обмоток.

Характерным для кривой выпрямленного напряжения является шестикратная частота повторяемости пульсаций по отношению к частоте питающего выпрямитель напряжения.

Среднее значение выпрямленного напряжения при работе выпрямителя в режиме холостого хода (без учета влияния времени на коммутацию) может быть найдено по среднему значению интеграла за один период пульсаций (равный  $2\pi/6$ ):

$$E_{d0} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi/6}^{+\pi/6} \sqrt{2} E_{2n} \cos \theta d\theta = \frac{\sqrt{2} E_{2n} \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = \frac{\sqrt{6} \sin \frac{\pi}{6}}{\frac{\pi}{6}} = 1,35 E_{2n} = 2,34 E_2. \quad (1)$$

Среднее значение анодного тока в вентиле (при продолжительности его работы в периоде переменного тока  $2\pi/3$  рад) равно

$$I_a = I_d / 3. \quad (2)$$

Учитывая усредненный показатель падения напряжения, вызванного реактивным сопротивлением питающего трансформатора за шесть периодов (пульсаций) выпрямленного напряжения, а также соотношение между анодным и выпрямленным током (2), получим следующее:

$$\Delta U_x = \frac{I_a x_a}{2\pi/6} = \frac{I_d x_a}{\pi}. \quad (3)$$

Вычитая падение напряжения  $\Delta U_x$  из напряжения холостого хода, получим аналитическое выражение для внешней характеристики выпрямителя:

$$U_d = 2,34 E_2 - \frac{I_d x_a}{\pi}. \quad (4)$$

В (4)  $x_a$  – сопротивление трансфор-

матора,  $E_2$  – фазное напряжение трансформатора.

### 3. УПРАВЛЯЕМЫЙ ТРЕХФАЗНЫЙ МОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ

Работу и свойства управляемого выпрямителя рассмотрим с помощью MATLAB-модели, приведенной на рис. 6.

Нагрузкой тиристорного моста служит эквивалент двигателя постоянного тока. Система управления мостом – без обратной связи: угол зажигания  $\alpha$  подается на блок синхронизирующего 6-пульсного генератора от внешнего блока *Constant*.

Синхронизирующие напряжения **Uab, Ubc, Uca** подаются на вход генератора импульсов от вторичной обмотки силового трансформатора через фильтры 2-го порядка.

Обозначения в осциллограммах на рис. 7, характеризующих работу моста, такие же, как и на рис. 5. Имеется отличие в конечном значении угла  $\alpha$ . Значение угла  $\alpha$  отсчитывается от точки пересечения напряжений фаз **a** и **b** до начала коммутации тока с первого вентиле на третий (см. осциллограмму **Uabc**).

Для получения уравнения внешней характеристики управляемого выпрямителя

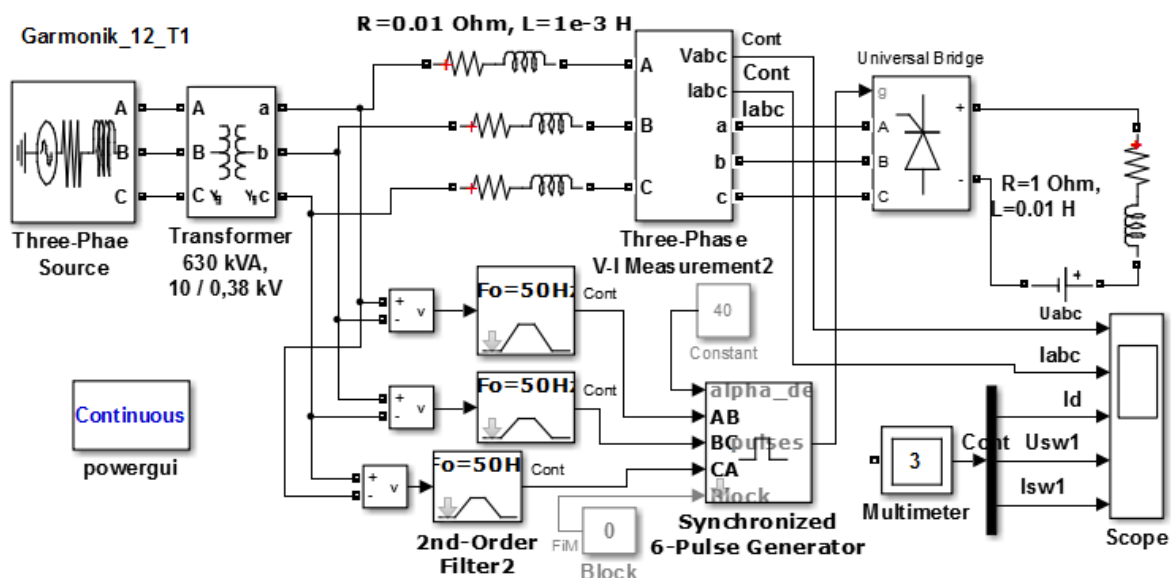


Рис. 6. MATLAB-модель управляемого выпрямителя (файл Garmonik\_12\_T1)  
Fig. 6. MATLAB-model of controlled rectifier (file Garmonik\_12\_T1)

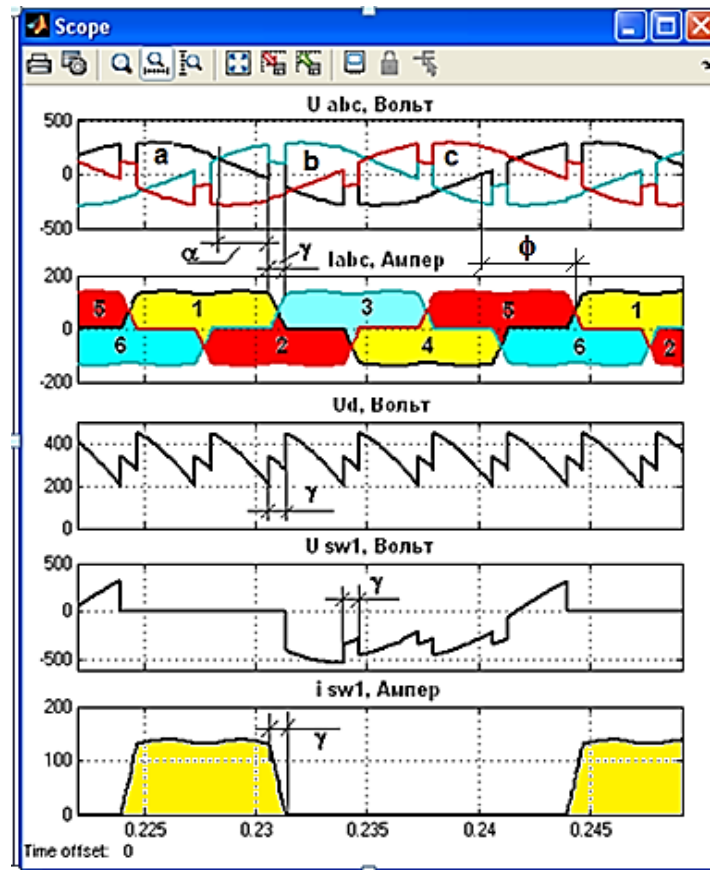


Рис. 7. Осциллограммы управляемого мостового выпрямителя  
 Fig. 7. Waveforms of the controlled bridge rectifier

определим среднее значение выпрямленного напряжения в пределах одного этапа повторяемости  $\frac{2\pi}{6}$  и отнесем интеграл к длительности этого этапа:

$$\begin{aligned} E_{d\alpha 0} &= \frac{1}{2\pi/6} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \sqrt{2} E_{2n} \cos \theta d\theta = \\ &= \sqrt{2} E_{2n} \frac{6}{\pi} \sin \frac{\pi}{6} \cos \alpha = \\ &= 0,955 \sqrt{2} E_{2n} \cos \alpha. \end{aligned}$$

Учитывая, что выражение падения напряжения на этапе коммутации  $\Delta U_x$ , определенное через выпрямленный ток  $I_d$ , остается таким же, как и в неуправляемом выпрямителе, получаем выражение внешней характеристики управляемого выпрямителя:

$$\begin{aligned} U_{d\alpha} &= E_{d\alpha 0} - \frac{6}{2\pi} I_d x_a = \\ &= 0,955 \sqrt{2} \sqrt{3} E_2 \cos \alpha - \frac{3}{\pi} I_d x_a. \end{aligned} \quad (5)$$

Выразим уравнение (5) в относительных единицах. Примем за базисное напряжение амплитуду фазного напряжения  $U_\phi = \sqrt{2} E_2$ , а за базисный ток – амплитуду тока короткого замыкания  $i_{y0} = \frac{\sqrt{2} E_2}{0,5 x_a} k_{y0}$ .

Выражение внешней характеристики в относительных единицах выглядит следующим образом:

$$U^* = 0,955 \sqrt{3} \cos \alpha - 0,955 I_d^*. \quad (6)$$

Внешние характеристики управляемого мостового выпрямителя, построенные в соответствии с (6), приведены на рис. 8 [1].

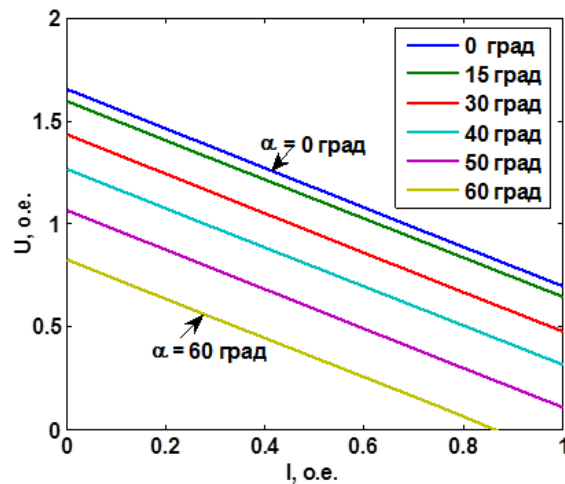


Рис. 8. Внешняя характеристика выпрямителя  
Fig. 8. External characteristic of the rectifier

Поскольку трансформатор подключен к системе, мощность которой несоизмеримо больше мощности трансформатора, то напряжение на первичной обмотке останется постоянным при кз во вторичной обмотке. Следовательно, ток кз определяется только сопротивлением вторичной обмотки, приведенное значение которой равно половине сопротивления трансформатора. Активное сопротивление трансформатора намного меньше индуктивного и в настоящих расчетах оно не учитывается. Поэтому ударный коэффициент можно принять равным единице.

#### 4. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХФАЗНЫХ МОСТОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Действующее значение тока вторичной обмотки трансформатора при угле коммутации  $\gamma$  близком нулю, равно

$$I_2 = \sqrt{\frac{12}{\pi} I_d^2 \frac{4\pi}{3}} = \sqrt{2/3\pi} I_d,$$

и мощность выпрямителя

$$P_d \approx U_{d0} I_d,$$

где  $U_{d0}$  определяется в соответствии с (1).

В рассматриваемом режиме работы выпрямителя мощность трансформатора,

подключенного к сети переменного тока, определяется следующим выражением:

$$\begin{aligned} P_d &\approx P_{d0} = 3U_{d0} I_d = \\ &= 3\sqrt{2/3} I_d \frac{U_d}{2,34} = 1,045 P_d. \end{aligned} \quad (7)$$

Из (7) следует, что мощность трансформатора практически равна мощности нагрузки на выходе выпрямителя, что является хорошим свойством мостовых трехфазных выпрямителей по отношению к другим схемам выпрямления.

Мощность  $P_d$  используется как расчетная мощность, однако из-за несинусоидальности фазных токов выпрямитель потребляет из сети переменного тока большую мощность по сравнению с  $P_d$ .

Полная мощность, взятая выпрямителем из сети,

$$S = \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2}, \quad (8)$$

где  $P_1 = P_d = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1$  – активная мощность первой гармоники;  $Q_1 = 3U_1 I_1 \sin \varphi_1$  – реактивная мощность первой гармоники;  $T$  – мощность искажения, вызванная высшими гармоническими составляющими фазного тока и фазного напряжения.

Кривая фазного тока представляет собой фигуры, близкие к прямоугольникам в

положительной и отрицательной частях кривой тока (см. рис. 5 и рис. 7), т.е. периодическую нечетную функцию с периодом  $T = 2\pi$ , симметричную относительно оси абсцисс. Следовательно, в разложении в ряде Фурье будут отсутствовать постоянная составляющая, четные гармоники, четные функции (содержащие косинус), а также гармоники, кратные трем.

На рис. 9 и 10 приведены данные гармонического анализа, полученные с помо-

щью программы *FFT analysis* графического интерфейса пользователя *Powergui*. Разложение выполнено как для токов, так и напряжений в диапазоне частоты до 1000 Гц, поэтому в разложении кроме основной гармоники присутствуют гармоники под номерами 5, 7, 11, 13, 17, 19. В результатах гармонического анализа приведены данные по коэффициенту нелинейных искажений  $K_{\mu}$  (THD в английском обозначении этого показателя качества).

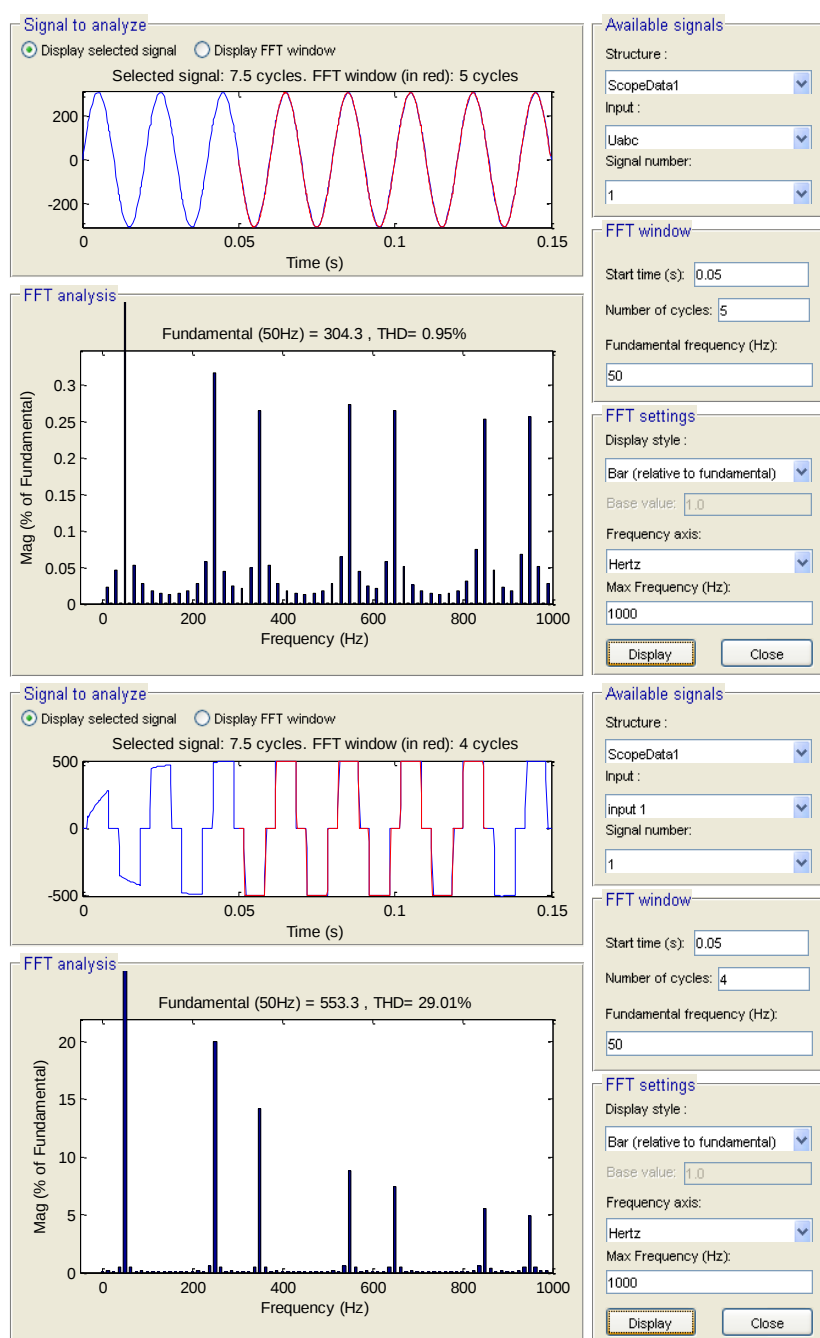


Рис. 9. Гармонический анализ фазных кривых напряжения и тока для неуправляемого выпрямителя  
 Fig. 9. Harmonic analysis of voltage and current phase curves for uncontrolled rectifier

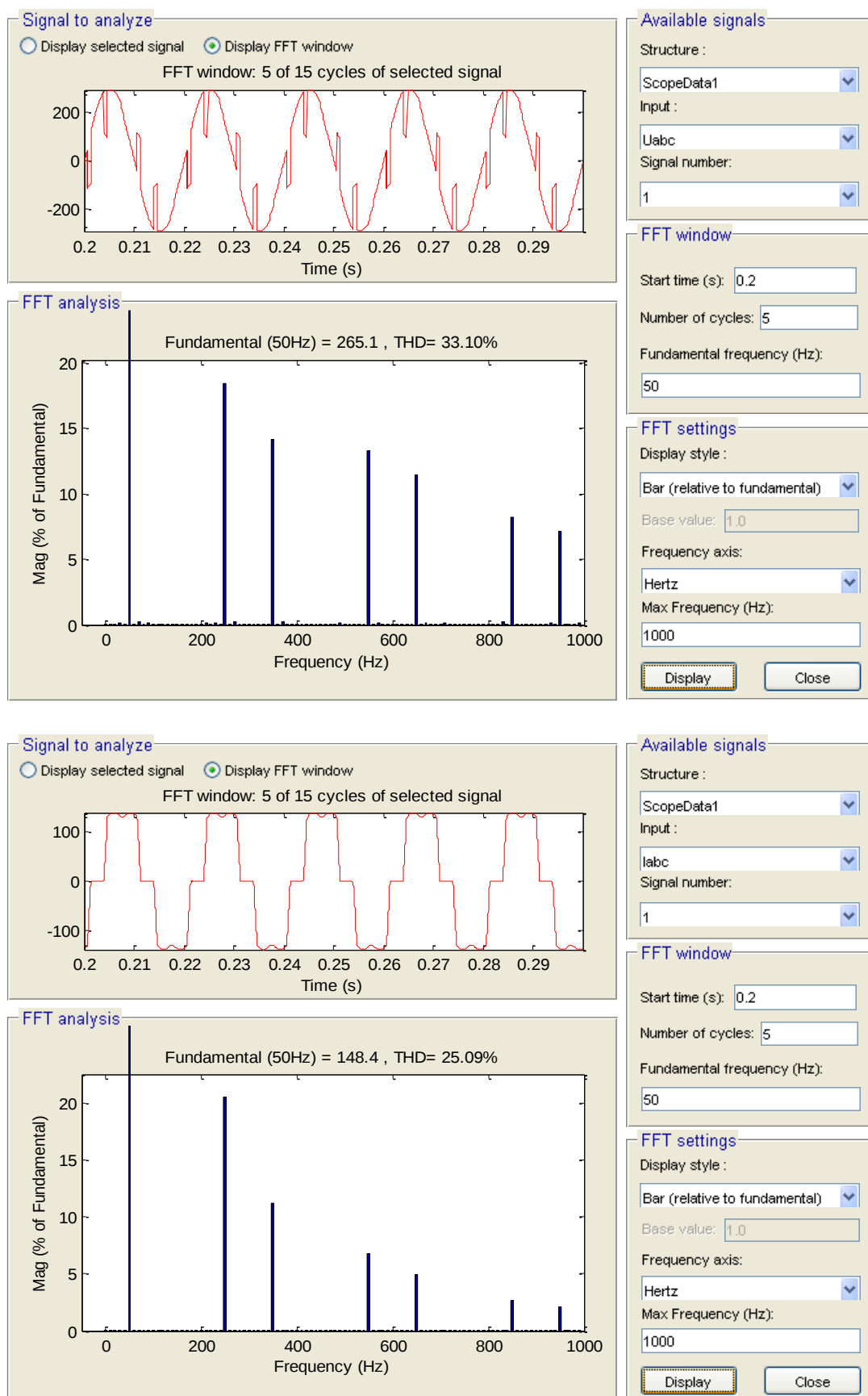


Рис. 10. Гармонический анализ фазных кривых напряжения и тока для управляемого выпрямителя  
Fig. 10. Harmonic analysis of voltage and current phase curves for controlled rectifier

Для получения более точного (чем на рис. 7) значения угла  $\varphi$  в осциллограмме на рис. 11 выделен угол между первой гармонической фазой тока  $a$  и напряжением фазы  $a$ . Этот угол составляет  $\varphi = 47^\circ$ , следовательно, коэффициент мощности управляемого выпрямителя  $\cos \varphi = 0,6820$ . По этой же осциллограмме определены угол открытия тиристора  $\alpha = 40^\circ$  (что соответствует заданному углу) и угол коммутации  $\gamma = 12,6^\circ$ . Расчет угла  $\varphi$  по известной формуле

$\varphi = \alpha + 0,5\gamma$  практически совпадает с результатом, найденным по осциллограмме.

Подпрограмма для определения угла  $\varphi$  приведена на рис. 12. По значениям первых гармонических составляющих напряжения и тока на рис. 9 и рис. 10 и  $\cos \varphi$  определяются активная  $P_1$  и реактивная  $Q_1$  составляющие потребляемой мощности. Мощность искажения принимается пропорционально коэффициенту нелинейных искажений  $K_\mu$ .

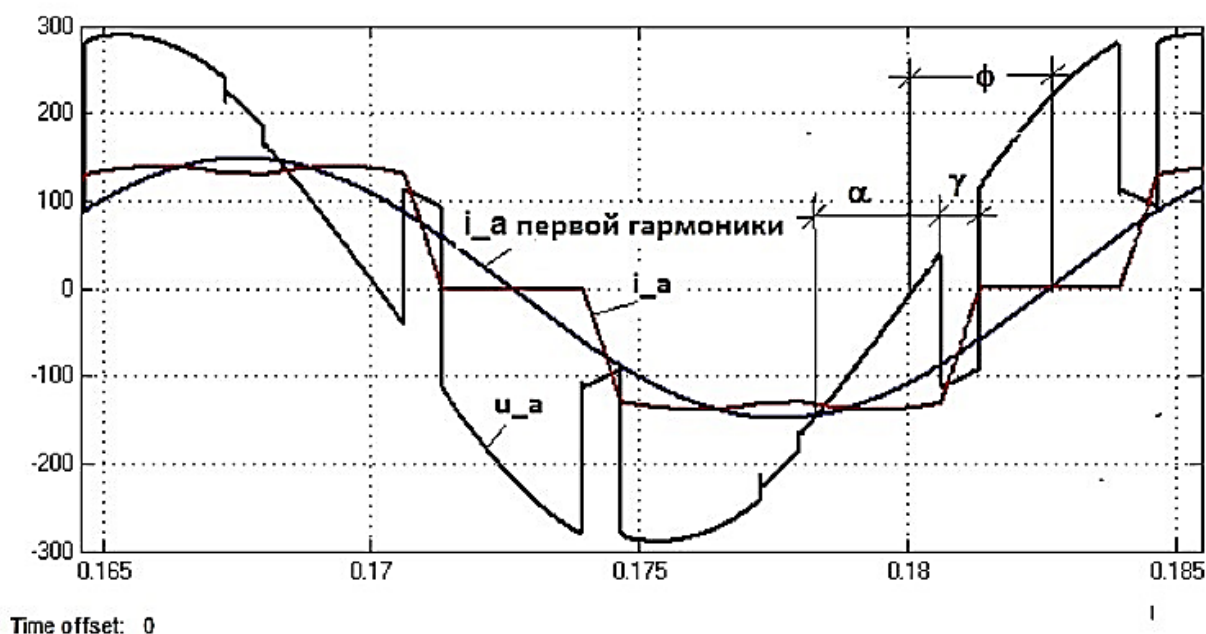


Рис. 11. Осциллограмма для определения угла  $\varphi$   
 Fig. 11. Waveform for  $\varphi$  angle determination

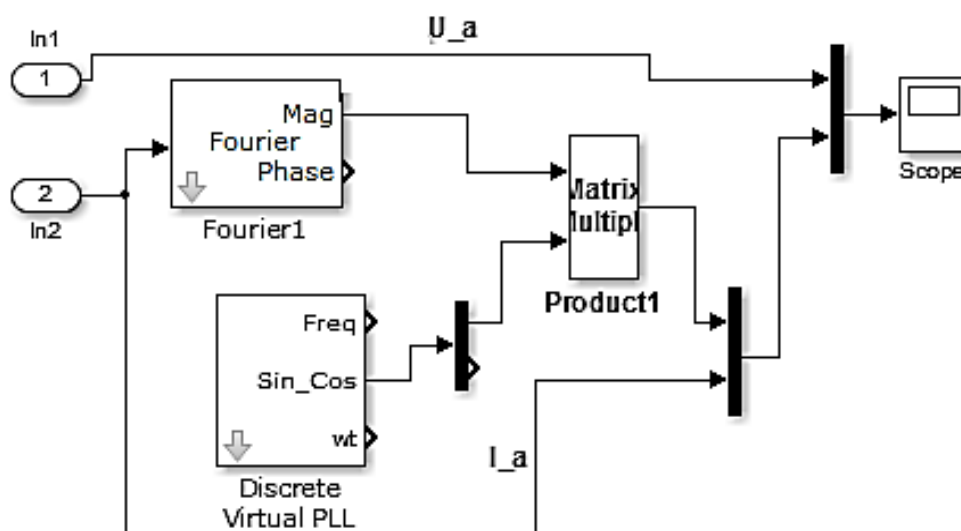


Рис. 12. Подпрограмма для определения угла  $\varphi$   
 Fig. 12. Subroutine for  $\varphi$  angle determination



Для исходных данных в модели управляемого выпрямителя:

$$\begin{aligned}P_1 &= P_d = 3U_1 I_1 \cos \varphi = 3 \cdot 265 \cdot 148 \cdot 0,682 = \\&= 80,244 \text{ кВт}; Q_1 = 3U_1 I_1 \sin \varphi = \\&= 3 \cdot 265 \cdot 148 \cdot 0,73 = 85,9 \text{ кВт}; \\S_1 &= \sqrt{80,244^2 + 85,9^2} = 117,55 \text{ кВт}.\end{aligned}$$

Мощность искажения:

$$\begin{aligned}T &= U_1 \cdot (0,01 \cdot k_{\mu U}) \times I_1 \cdot (k_{\mu I}) = \\&= 265 \cdot 0,331 \times 148 \cdot 0,259 = 2,924 \text{ кВт}.\end{aligned}$$

Полная мощность с учетом мощности искажения:

$$\begin{aligned}S &= \sqrt{P_1^2 + Q_1^2 + T^2} = \\&= \sqrt{80,244^2 + 85,9^2 + 2,924^2} = \\&= 120,11 \text{ кВт}.\end{aligned}$$

В неуправляемом выпрямителе реактивная мощность отсутствует, что видно из осциллограммы на рис. 9.

$$\begin{aligned}P_1 &= P_d = 3U_1 I_1 \cos \varphi = \\&= 3 \cdot 304,3 \cdot 553,3 \cdot 1 = 505,107 \text{ кВт};\end{aligned}$$

Мощность искажения

$$\begin{aligned}T &= U_1 \cdot (0,01 \cdot k_{\mu U}) \times I_1 \cdot (k_{\mu I}) = \\&= 304,1 \cdot 0,0095 \times 553,3 \cdot 0,29 = \\&= 0,1633 \text{ кВт}.\end{aligned}$$

Поскольку мощность искажения является малой величиной по сравнению с  $P_1$ , то ее можно не учитывать.

## 5. ИНВЕРТИРОВАНИЕ ТОКА

При выпрямлении тока электрическая мощность передается из цепи переменного тока в цепь постоянного тока, а при инверторном режиме поток электрической мощности переходит от источника постоянного тока в цепь переменного тока.

С целью определения условий, при которых в преобразователях электрической энергии изменилось направление потока мощности, рассмотрим электрическую цепь постоянного тока, содержащую аккумуляторную батарею и машину постоянного тока, представленную на рис. 13 а. В данном случае аккумуляторная батарея является источником электрической энергии и разряжается, а электрическая машина выступает потребителем энергии, т.е. работает в режиме двигателя, поскольку развиваемая двигателем противо-ЭДС (электродвижущая сила)  $E_d$  направлена навстречу ЭДС аккумуляторной батареи  $E_a$  и току, создаваемому ею в цепи. В этом режиме  $E_a > E_d$ , и ток в цепи определяется их разностью и сопротивлением  $R$ :

$$I_a = \frac{E_a - E_d}{R}.$$

Рассмотрим случай изменения направления вращения электрической машины при переводе ее в режим генератора – рис. 13 б. Это имеет место у подъемных устройств, когда используется режим электродинамического торможения, а якорь машины под действием спускаемого груза изменит направление вращения. Если при этом  $E_d > E_a$ , то направление ЭДС  $E_d$  и направление тока  $I_a$  в цепи совпадут, электрическая машина перейдет в режим генератора, а батарея начнет разряжаться.

Таким образом, отдача или прием мощности зависят от того, совпадают по направлению ЭДС и ток в данном источнике или они направлены противоположно. Из этого следует, что изменение направления потока мощности может быть достигнуто изменением направления тока в цепи при сохранении полярности напряжения источников либо изменением полярности источников и сохранения направления тока в цепи.

Схема на рис. 13 будет работать в режиме инвертирования тока при условии – если ЭДС машины постоянного тока будет выше ЭДС батареи  $E_d > E_a$ .

В электроприводах с машинами постоянного тока применяют не аккумуляторные батареи, а сеть переменного тока с выпрямителями.

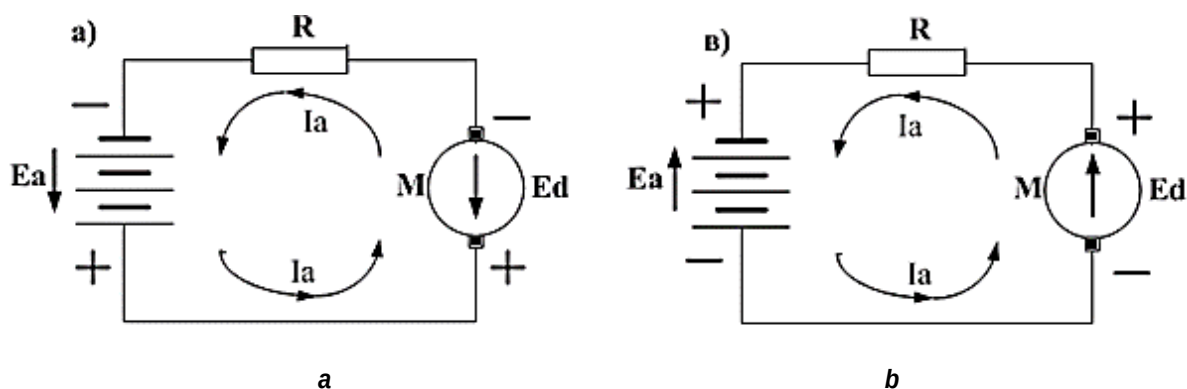


Рис. 13. Режим работы инвертора: а – электрическая цепь постоянного тока из аккумуляторной батареи и машины постоянного тока; б – электрическая машина при переводе в режим генератора  
 Fig. 13. Inverter operation mode: a – DC circuit including the battery and DC machine;  
 b – electric machine when being switched to the generator mode

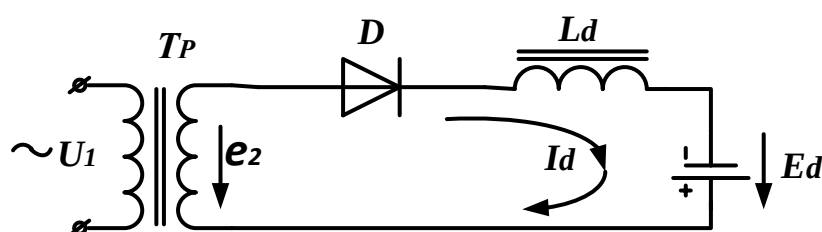


Рис. 14. Схема с однополупериодным выпрямлением  
 Fig. 14. Half-wave rectification circuit

На рис. 14 показана однополупериодная схема выпрямления, которая питает машину постоянного тока – эквивалентную схему якоря, состоящую из источника ЭДС и индуктивности  $L_d$ .

Для того чтобы электрическая машина стала источником энергии, необходимо совпадение направления ее ЭДС  $E_d$  с направлением тока, протекающего через диод, как это показано на рис. 14.

Чтобы вторичная обмотка трансформатора  $T_p$  выполняла функцию приемника энергии, необходимо включать вентиль в те интервалы времени, когда ток и ЭДС вторичной обмотки  $T_p$  будут совпадать по направлению. Отсюда следует, что вентиль должен быть управляемым, т.е. тиристором либо одним из других электронных приборов, показанных выше.

## 6. АВТОНОМНЫЙ МОСТОВОЙ ИНВЕРТОР

SPS-модель автономного мостового инвертора для питания трехфазной нагрузки переменного тока мощностью 25 кВт с частотой 50 Гц представлена на рис. 15.

В качестве вентилях применены быстродействующие силовые электронные приборы IGBT, шунтированные диодом, соединенные по стандартной схеме 6-вентильного моста. Источник постоянного напряжения – аккумуляторная батарея или электронная схема преобразователя переменного тока в постоянный. На шесть вентилях подаются управляющие импульсы от дискретного PWM-генератора (PWM – Pulses With Modulation – импульсы с модуляцией).

В SPS-модели заданы постоянным напряжением на входе инвертора –  $V_{dc} = 780$  В, частотой модулирующего напряжения –  $f_m = 5000$  Гц, модулирующим индексом –  $m = 0,8$  (частотой выходного напряжения инвертора).

На рис. 16 и 17 представлены осциллограммы напряжений и токов в инверторе с частотами 25 и 50 Гц.

Значения  $f_m$ ,  $m$ ,  $f$  задаются в настройном окне блока Discrete PWM Generator. Там же может быть задана фаза управляющего сигнала относительно напряжения.



На осциллограф выведены мгновенные токи анод-катод первого и второго вентиля, ток и напряжение нагрузки.

На осциллограф 1 выведены линейное напряжение и ток фазы а с выхода моста.

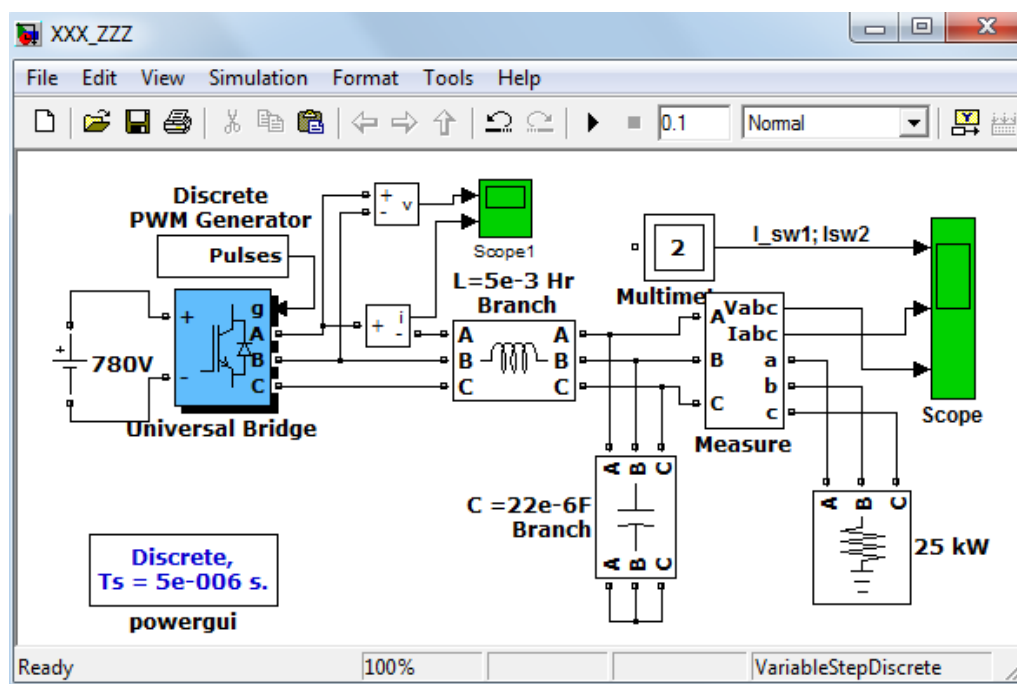


Рис. 15. SPS-модель мостового инвертора с управлением от дискретного PWM-генератора  
Fig. 15. SPS model of the discrete PWM generator-controlled bridge inverter

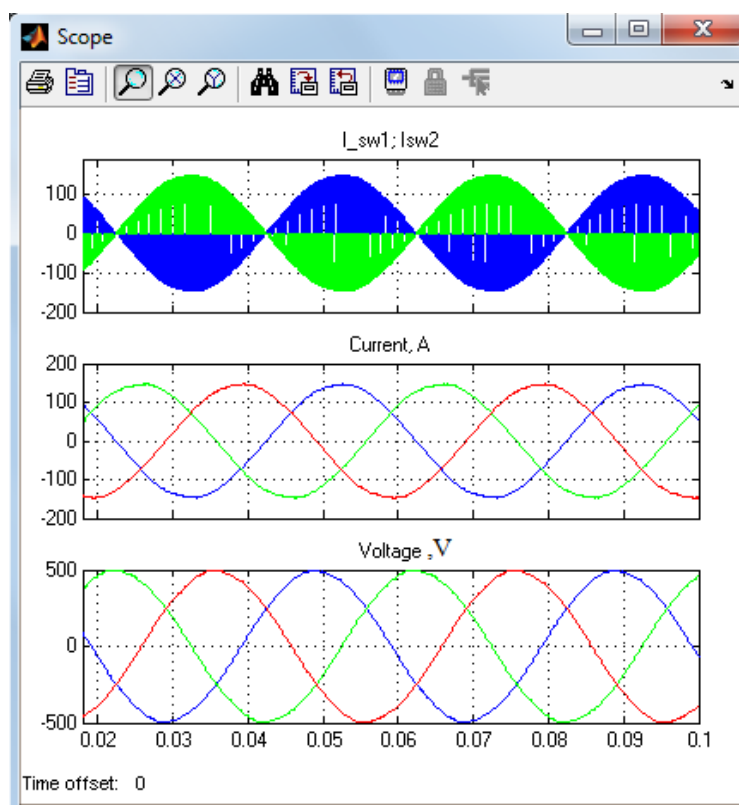


Рис. 16. Осциллограмма токов и напряжения инвертора частотой 25 Гц  
Fig. 16. 25 Hz inverter current and voltage waveform

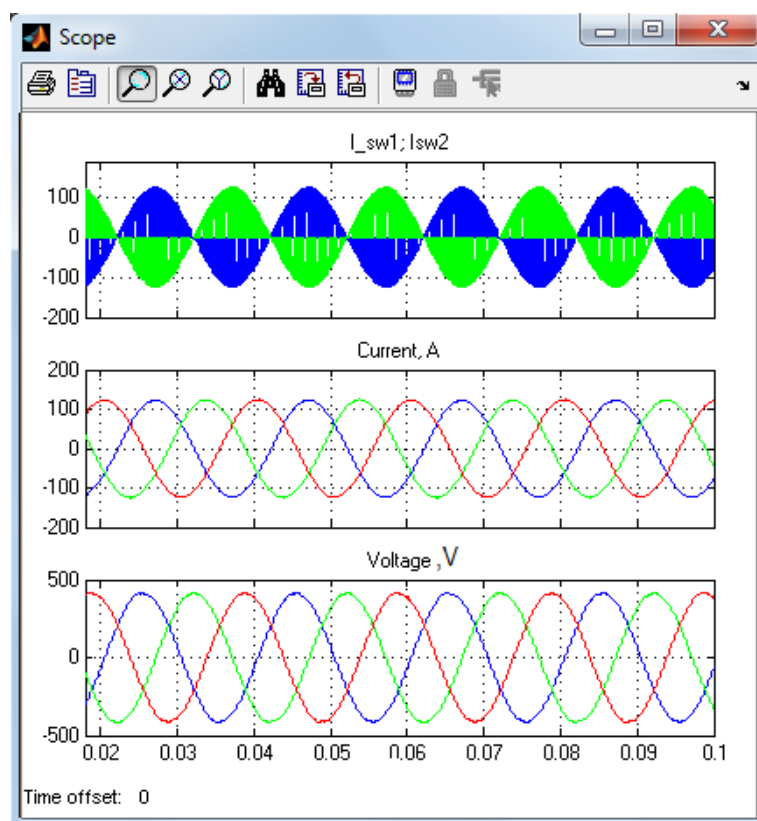


Рис. 17. Осциллограмма тока и напряжения инвертора частотой 50 Гц  
 Fig. 17. 50 Hz inverter current and voltage waveform

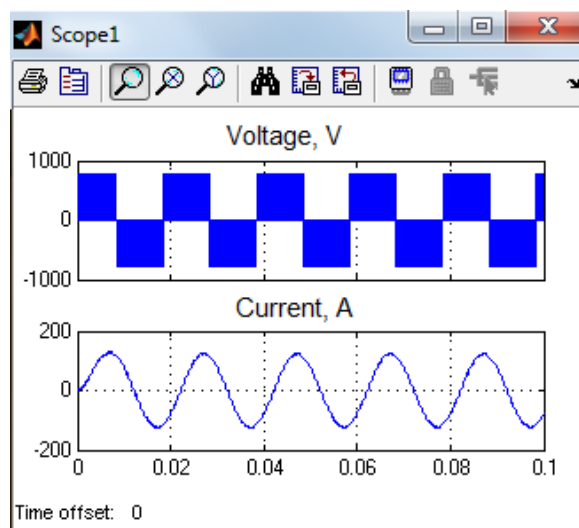


Рис. 18. Осциллограмма тока и напряжения мостового инвертора  
 Fig. 18. Current and voltage waveform of a bridge inverter

Как видно из осциллограммы на рис. 18, мостовой инвертор генерирует однополярное напряжение, изменяющееся между 0 и +780 В для одной половины цикла, и затем между 0 и -780 В для следующей половины цикла. Чтобы выходное напряжение

инвертора было синусоидальным, необходима установка фильтров, не пропускающих высшие гармонические напряжения. В схеме на рис. 15 – это трехфазный LC-фильтр.

Последовательность срабатывания вентилей в мостовом инверторе: 1–2; 3–4;

5–6. Следовательно, ток инвертора фазы  $a$  генерируется токами вентиля 1–2, ток фазы  $b$  – токами вентиля 3–4, ток фазы  $c$  – 5–6. В этой связи на фазный ток при выходе моста кроме тока заданной частоты накладывается ток модуляции двойной частоты, который не пропускает цепь нагрузки, поэтому выходной ток практически не содержит высших гармонических составляющих.

На рис. 16, 17 показаны осциллограммы инвертора, работающего как источник напряжения с двумя заданными частотами – 50 и 25 Гц. Может быть задано любое значение частоты.

## 7. АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР СО СТАБИЛИЗИРОВАННЫМ НАПРЯЖЕНИЕМ

Применяется как автономный источник со стабилизацией напряжения при изменяющейся нагрузке.

Приведенная на рис. 19 схема выполнена в трехфазном исполнении. В ос-

нове используется такая же схема инвертирования, как и в предыдущем инверторе, но в схеме имеется отрицательная обратная связь с PI-регулятором. Обратная связь охватывает объект регулирования – это трехфазный мост (*PWM IGBT Inverter*), фильтр (*LC Filter*) и измеритель тока и напряжения. Крайний настроен на измерение напряжения в относительных единицах, где номинальное линейное действующее напряжение  $U_n = 380$  В соответствует нормированному максимальному значению переменного трехфазного напряжения в одну о.е. (относительную единицу).

Это нормированное напряжение подается на вход регулятора (*Voltage Regulator*), рис. 20. В схеме на рис. 20 направление сигналов слева направо, т.е. вход сигналов – слева схемы, а выход – справа. Регулятор преобразует трехфазный нормированный входной сигнал  $U_{abc}$  (pu) в два сигнала: однофазный – модулирующий индекс (в отечественной литературе этот термин называется глубиной модуляции) и трехфазный

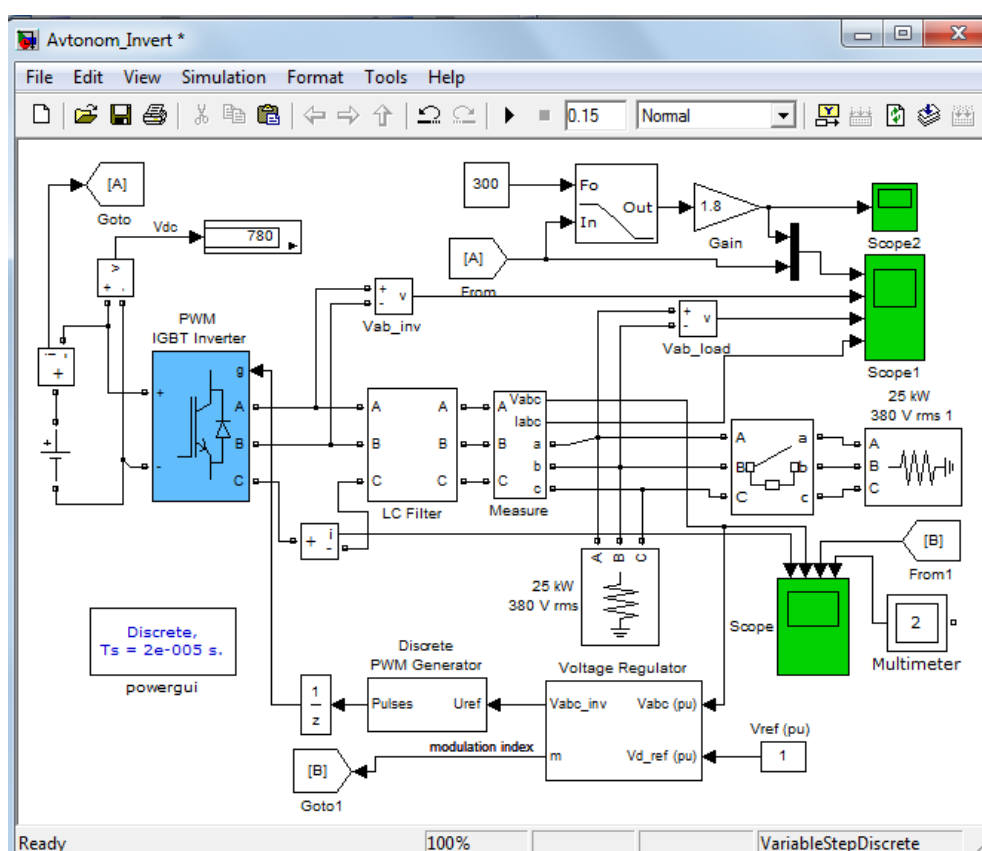


Рис. 19. SPS-модель автономного инвертора стабилизированного напряжения (файл: Avtonom\_Invert)  
Fig. 19. SPS-model of an autonomous inverter of stabilized voltage (file: Avtonom\_invert)

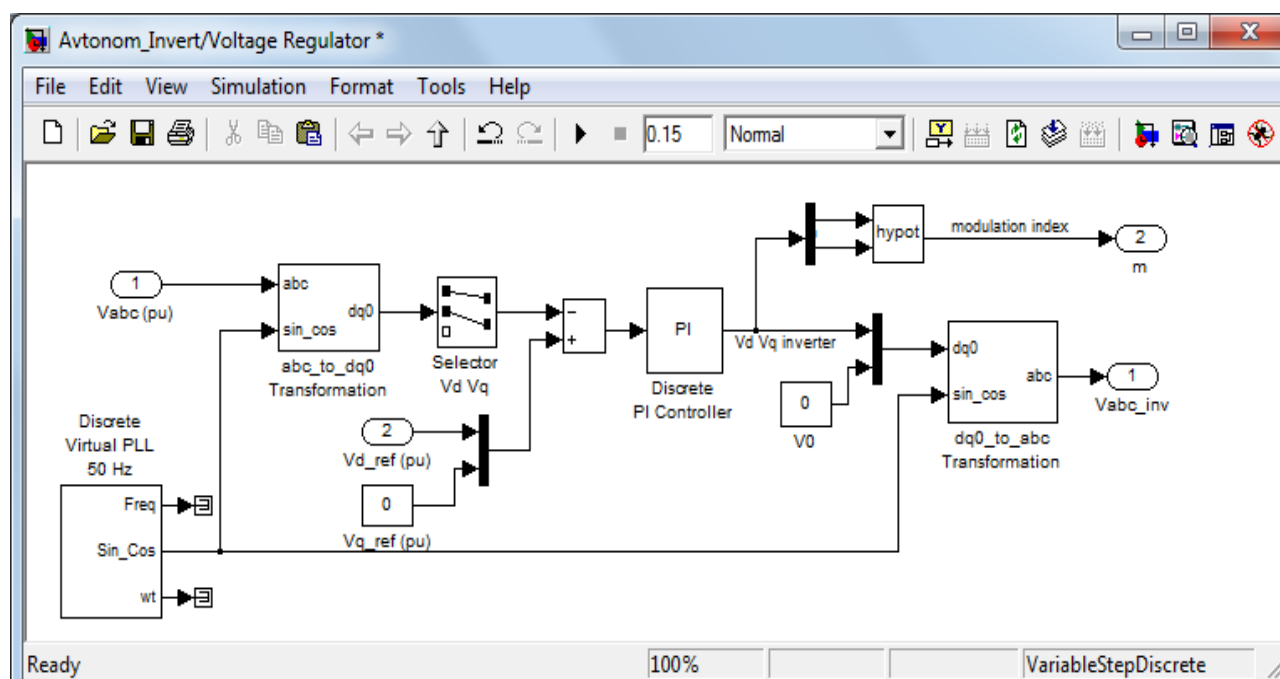


Рис. 20. Модель регулятора напряжения автономного инвертора  
 Fig. 20. Model of autonomous inverter voltage controller

нормированный  $V_{abc\_unf}$  как сигнал управления вентилями мостовой схемы после преобразования его генератором *discrete PWM generator*. В инверторе напряжения без стабилизации напряжения управляющий сигнал  $V_{abc\_unf}$  вырабатывается в самом генераторе *discrete PWM generator*, что определяется его настройкой. В регуляторе напряжения трехфазное напряжение  $V_{abc}(pu)$  преобразуется в координаты  $dq0$ .

Поскольку напряжение  $V_{abc}(pu)$  практически симметрично, то напряжение по координате 0 равно нулю, и оно не учитывается в дальнейшем.

После преобразования симметричной трехфазной схемы в координаты  $dq0$  напряжение по координате  $U_q$  равно нулю (в стационарном режиме), и при сравнении заданное значение  $U_{q\_ref}(pu)$  принимается равным нулю. Таким образом, сравниваются два сигнала:  $U_d(pu)$  и заданный –  $U_{d\_ref}(pu)$ . После сравнения получается сигнал ошибки регулирования, который подается на ПИ-регулятор. После его прохождения полученные сигналы  $U_d$  и  $U_q$  преобразуются по двум направлениям: получение модулирующего индекса  $m$  и трехфазного напряжения  $V_{abc\_inv}$ .

Частота тока выходной сети инвертора задается блоком *Discret Virtual PLL*.

Моделирующий индекс, в сущности, является обобщенным трехфазным вектором напряжения с учетом действия ПИ-регулятора, а трехфазное напряжение, которое подается на вход PWM-генератора, также учитывает влияние ПИ-регулятора.

Изменять уровень стабилизированного напряжения можно значением  $U_{d\_ref}(pu)$ , а также в небольших пределах – значением индекса модуляции  $m$ .

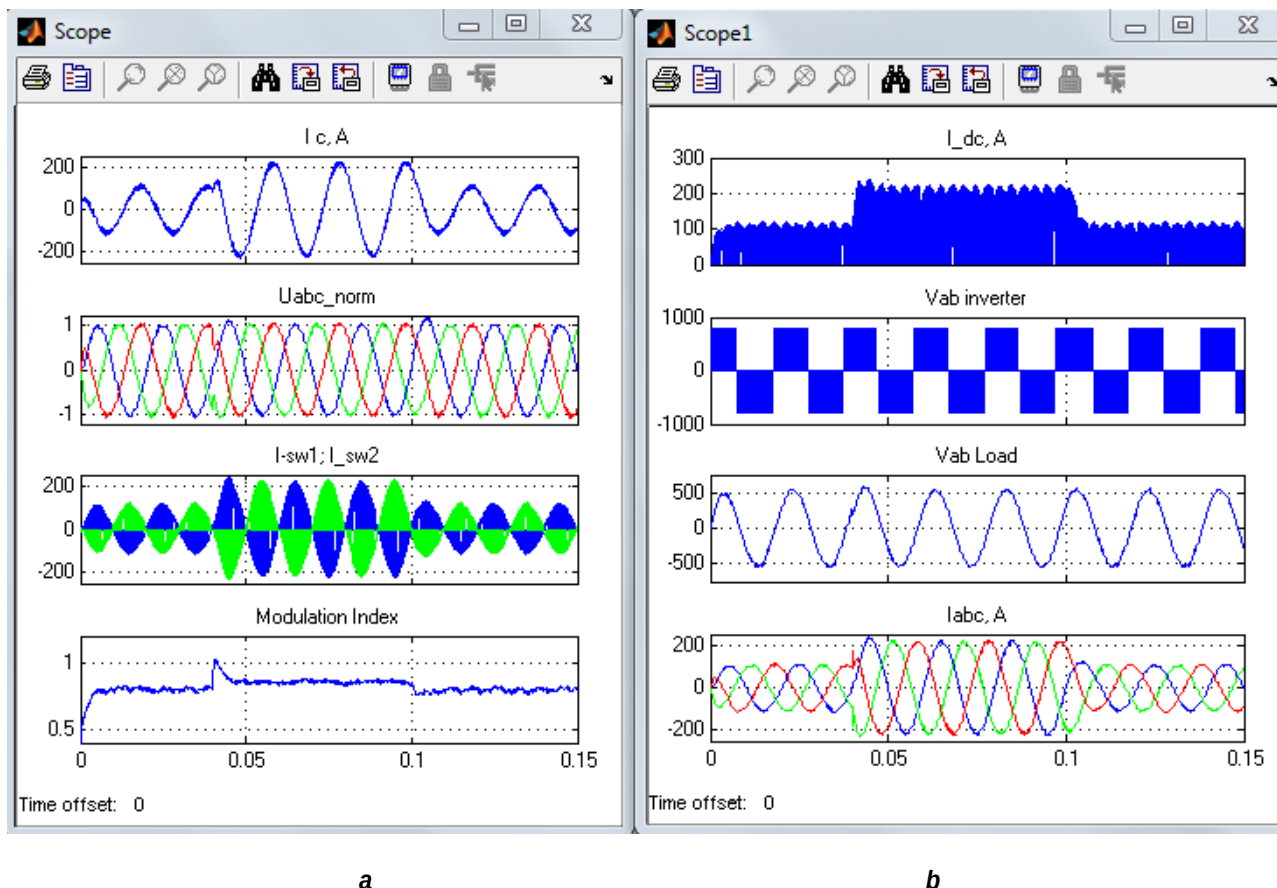
На рис. 21 и 22 представлены осциллограммы токов и напряжений инвертора со стабилизацией напряжения и заданными частотами выходной сети в 50 и 25 Гц, соответственно. Возмущенный режим создавался включением и отключением половины нагрузки.

Как следует из осциллограммы напряжения на нагрузке, режим регулирования астатический; время восстановления регулируемой величины при включении и отключении половинной нагрузки близко к нулю за счет большого коэффициента по интегралу от ошибки регулирования в регуляторе –  $K_{\text{и}} = 1200$ .

## 8. ТРЕХФАЗНЫЙ МОСТОВОЙ ИНВЕРТОР, ВЕДОМЫЙ СЕТЬЮ

SPS-модель инвертора (рис. 24) состоит из трехфазного источника, понижаю-

щего трансформатора, низкая сторона которого связана с тиристорным мостом через измерительное устройство, что, в сущности, и является схемой электропривода с двигателем постоянного тока.



**Рис. 21. Осциллограммы токов и напряжений инвертора частотой 50 Гц:**  
а – ток в фазе с; нормированное (в о.е.) трехфазное напряжение; модулирующий индекс;  
токи 1-го и 2-го инверторов; б – ток на постоянной стороне инвертора; напряжения  
на выходе инвертора и на нагрузке; трехфазный ток нагрузки

**Fig. 21. 50 Hz inverter current and voltage waveforms: a – current in phase C; normalized (in relative units) three-phase voltage; modulating index; currents of the 1st and 2nd inverters; b – current on the constant side of the inverter; inverter output voltage and load voltage; three-phase load current**

В режиме торможения двигателем приводного механизма к якорю электрической машины прикладывается механический момент (противоположный электромагнитному), когда она работала в режиме двигателя. Якорь электрической машины начинает вращаться под действием этого момента и при оговоренных ранее условиях, электрическая машина переходит в режим генератора, т.е. создаются условия для работы схемы в режиме инвертора.

В схеме инвертора, в отличие от вы-

прямительной схемы на рис. 4, синхронизирующее напряжение  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$ ,  $U_{ca}$  подается на вход блока синхронизированного 6-пульсного генератора от трехфазного программируемого источника с нормированной амплитудой напряжения в одну о.е.

Осциллограммы напряжений и токов инвертора приведены на рис. 25. Здесь обозначено:  $\gamma$  – угол коммутации;  $\beta$  – угол опережения, который должен обеспечивать угол коммутации  $\gamma$  и угол восстановления  $\delta = \beta - \gamma$ ;  $\alpha$  – угол управления (зажигания) ти-

ристора, а также допустимый диапазон изменения угла  $\alpha - \beta$ .

Угол зажигания тиристора, который подается на блок синхронизирующего 6-пульсного генератора, должен учитывать фазовый сдвиг, задаваемый в трехфазном программируемом источнике, а также ширину импульса зажигания, задаваемого в блоке 6-пульсного генератора.

Фазовый сдвиг задавался равным  $90^\circ$ , ширина импульса зажигания –  $10^\circ$ . Таким образом, действительный угол зажигания  $\alpha = 90 + 10 - \alpha^* = 20^\circ$ . Здесь  $\alpha^* = 80^\circ$ , что

соответствует схеме на рис. 24.

В приведенной осциллограмме на рис. 25 эти углы составили:

$$\alpha - 20; \beta - 28,8; \\ \gamma - 14,4^\circ; \delta - 14,4^\circ.$$

Ток  $I_d = 60$  А, передаваемая в электрическую систему активная мощность  $I_d \cdot U_d = 24$  кВт. Это же значение показывает и измеритель активной мощности (см. рис. 26) одной фазы 8 кВт.

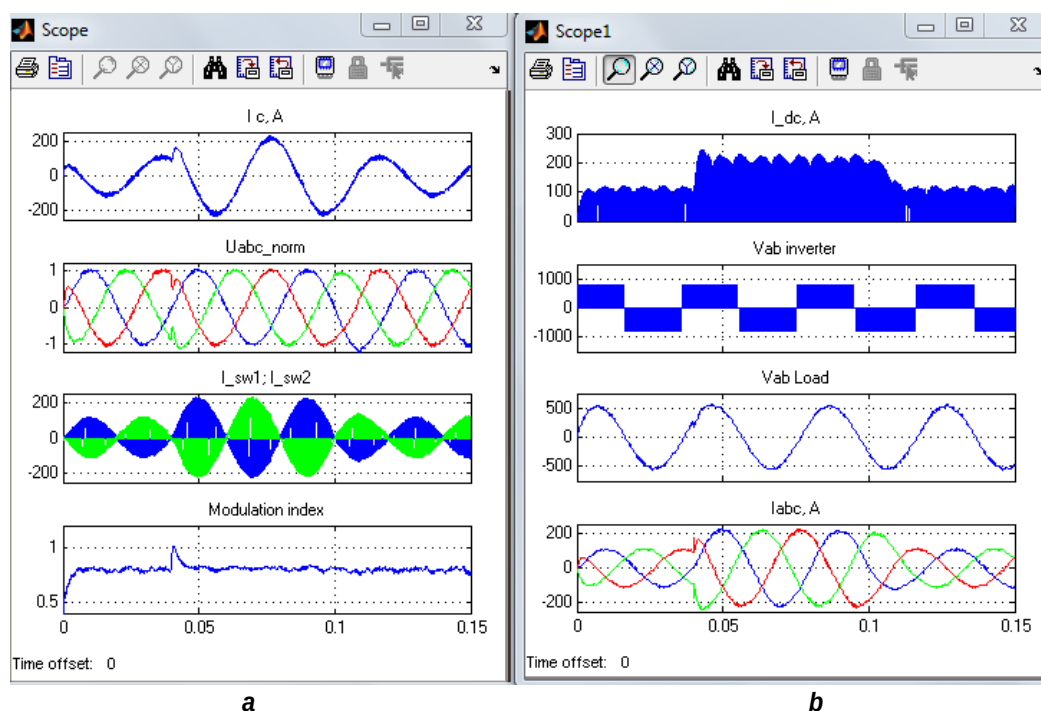


Рис. 22. Осциллограммы токов и напряжений инвертора частотой 25 Гц  
 Fig. 22. Waveforms of 25 Hz inverter currents and voltages

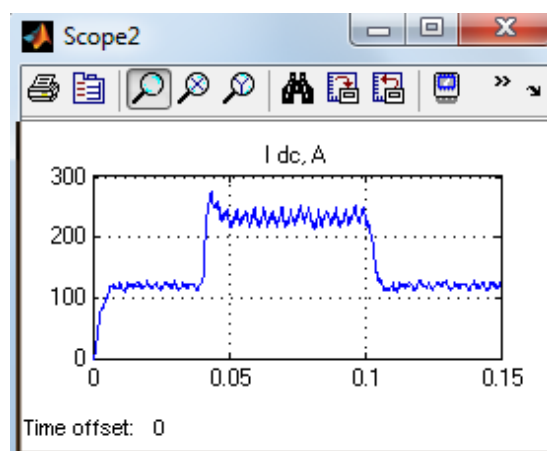
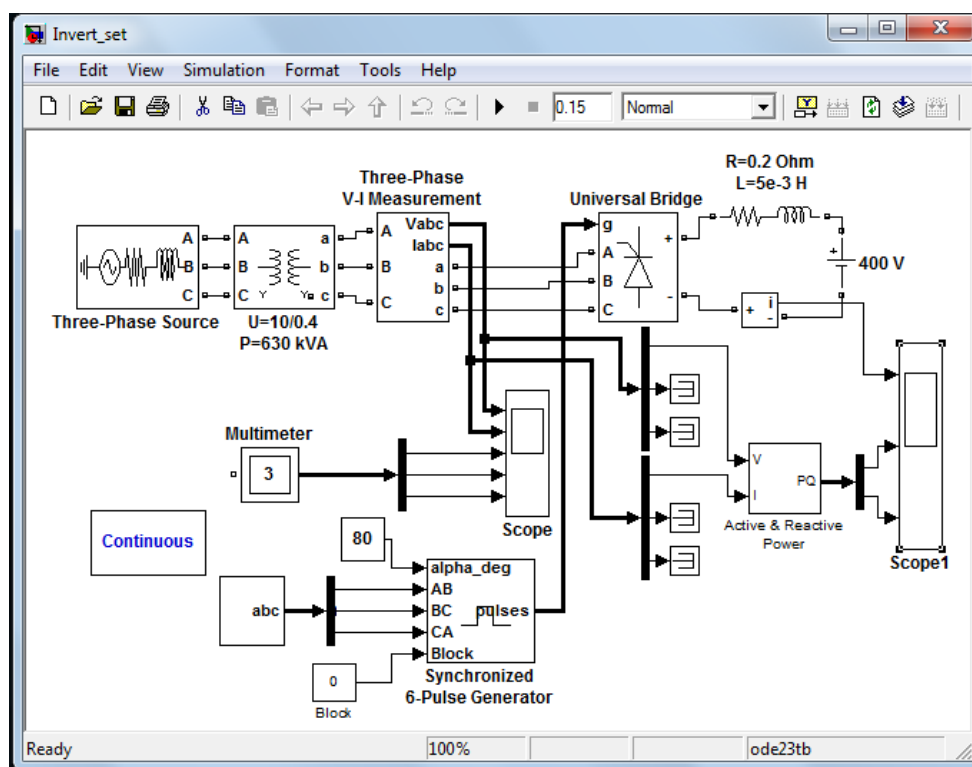
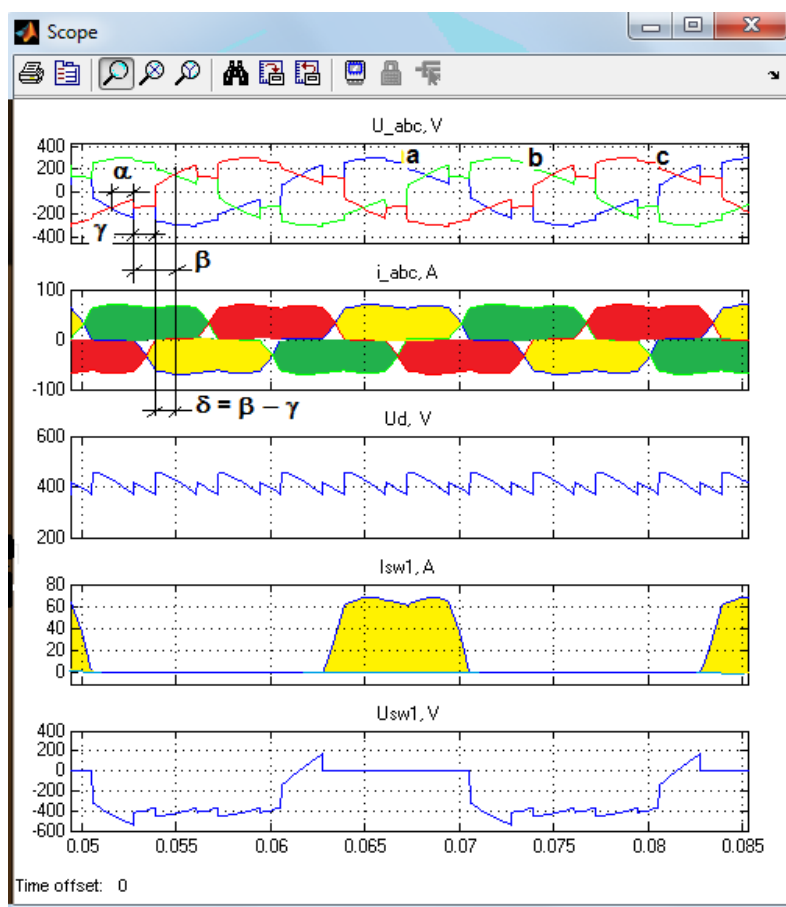


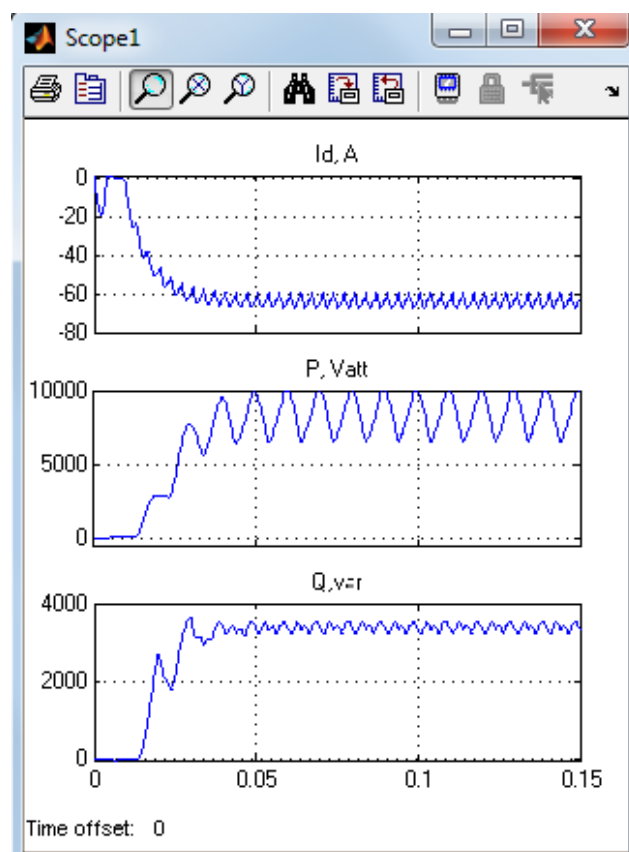
Рис. 23. Осциллограмма изменения тока на постоянной стороне инвертора без моделирующего сигнала  
 Fig. 23. Waveform of current variation on the constant side of the inverter without a modeling signal



**Рис. 24. SPS-модель трехфазного мостового инвертора, ведомого сетью**  
**Fig. 24. SPS-model of a network driven three-phase bridge inverter**



**Рис. 25. Осциллограммы токов и напряжений инвертора**  
**Fig. 25. Waveforms of currents and voltages of the network-driven inverter**



**Рис. 26. Ток и мощность, выдаваемая в сеть ведомого сетью**  
**Fig. 26. Current and power supplied to the network**

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье разработаны и исследованы трехфазные мостовые выпрямители и инверторы. Для разработки использовались методы имитационного моделирования в среде SimPowerSystems/Simulink комплекса MATLAB.

Раскрыты модели неуправляемого и управляемого трехфазного мостового выпрямителя, автономного мостового инвертора, автономного инвертора со стабилизированным напряжением, трехфазного мостового инвертора, ведомого сетью, в среде

SimPowerSystems/Simulink комплекса MATLAB.

Проведены исследования, которые показали корректность использования математического аппарата и принципов управления полупроводниковыми приборами.

Разработанные модели могут применяться для проведения исследований систем электроснабжения, содержащих источники возобновляемой энергии (как солнечные батареи), которые могут использоваться совместно с накопителями электрического питания, требующими наличия инверторных и выпрямительных устройств для соединения с электрической сетью.

### Библиографический список

1. Каганов И.Л. Промышленная электроника. М.: Высшая школа, 1968. 559 с.
2. Сайт компании «МикроАРТ» [Электронный ресурс]. URL: <http://www.invertor.ru/solbat.html> (дата обращения: 13.01.2019).
3. Портал SolarPowerEurope [Электронный ресурс]. URL: <http://www.solarpowereurope.org/home/> (дата обращения: 13.01.2019).
4. Linn S., Ze Ya. A. Solar/wind/diesel hybrid energy system with battery storage for rural electrification // International Journal of Scientific Engineering and Technology Research. 2014. Vol. 3. Issue 10. P. 2172–2176.
5. Nema P., Nema R.K., Rangnekar S.A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. No. 13(8). P. 2096–2103. DOI: 10.1016/j.rser.2008.10.006.



6. Feng Wu, Xiao-Ping Zhang, Ping Ju, Michael J.H. Sterling Decentralized Nonlinear Control of Wind Turbine With Doubly Fed Induction Generator, IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Vol. 23. No. 2. P. 613–621.
  7. Le-Ren Chang-Chien, Chih-Min Hung, Yao-Ching Yin. Dynamic Reserve Allocation for System Contingency by DFIG Wind Farms, IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Vol. 23. No. 2. P. 729–736.
  8. Kayikci M., Milanovic J.V. Dynamic Contribution of DFIG-Based Wind Plants to System Frequency Disturbances, IEEE Transactions on Power Systems. 2009. Vol. 24. No. 2. P. 859–867.
  9. Konopinski R.J., Vijayan P., Ajarapu V. Extended Reactive Capability of DFIG Wind Parks for Enhanced System Performance, IEEE Transactions on Power Systems. 2009. Vol. 24. No. 3. P. 1346–1355.
  10. Пионкевич В.А. Анализ качества электрической энергии, вырабатываемой асинхронными генераторами с тиристорными регуляторами напряжения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 22–26 апреля 2013 г.). Иркутск, 2013. С. 270–274.
  11. Пионкевич В.А., Новожилов М.А. Математическая модель асинхронного генератора для задач регулирования напряжения. Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов: сб. тр. (г. Тольятти, 30 марта – 17 апреля 2009 г.). Тольятти, 2009. С. 134–139.
  12. Пионкевич В.А. Исследование параллельной работы источников распределенной генерации с асинхронными генераторами на основе тиристорных регуляторов напряжения, работающих в режиме инвертора // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 26–30 апреля 2010 г.). С. 434–439.
  13. Новожилов М.А., Пионкевич В.А. Малая гидроэнергетика для электроснабжения удаленных потребителей в современных условиях. Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2016. 168 с.
  14. Веников В.А., Худяков В.В., Анисимова Н.Д. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения. М.: Высш. шк., 1972. 368 с.
- ### References
1. Kaganov I.L. *Promyshlennaya elektronika* [Industrial electronics]. Moscow: Vysshaya shkola, 1968, 559 p.
  2. The site of the company "MikroART". Available at: <http://www.invertor.ru/solbat.html> (accessed 13 June 2018).
  3. SolarPowerEurope Portal. Available at: <http://www.solarpowereurope.org/home/> (accessed 13 June 2018).
  4. Linn S., Ze Ya. A. Solar/wind/diesel hybrid energy system with battery storage for rural electrification. International Journal of Scientific Engineering and Technology Research, 2014, vol. 3, issue 10, pp. 2172–2176.
  5. Nema P., Nema R.K., Rangnekar S. A current and future state of art development of hybrid energy system using wind and PV-solar: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, no. 13(8), pp. 2096–2103. DOI: 10.1016/j.rser.2008.10.006.
  6. Feng Wu, Xiao-Ping Zhang, Ping Ju, Michael J.H. Sterling Decentralized Nonlinear Control of Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator, IEEE Transactions on Power Systems, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 613–621.
  7. Le-Ren Chang-Chien, Chih-Min Hung, Yao-Ching Yin. Dynamic Reserve Allocation for System Contingency by DFIG Wind Farms, IEEE Transactions on Power Systems, 2008, vol. 23, no. 2, pp. 729–736.
  8. Kayikci M., Milanovic J.V. Dynamic Contribution of DFIG-Based Wind Plants to System Frequency Disturbances, IEEE Transactions on Power Systems, 2009, vol. 24, no. 2, pp. 859–867.
  9. Konopinski R.J., Vijayan P., Ajarapu V. Extended Reactive Capability of DFIG Wind Parks for Enhanced System Performance, IEEE Transactions on Power Systems, 2009, vol. 24, no. 3, pp. 1346–1355.
  10. Понкевич В.А. Анализ качества электрической энергии, вырабатываемой асинхронными генераторами с тиристорными регуляторами напряжения // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (Иркутск, 22–26 апреля 2013 г.). Иркутск, 2013. С. 270–274.
  11. Понкевич В.А., Новожилов М.А. Математическая модель асинхронного генератора для задач регулирования напряжения. Энергоэффективность и энергобезопасность производственных процессов // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов, аспирантов: сб. тр. (г. Тольятти, 30 марта – 17 апреля 2009 г.). Тольятти, 2009. С. 134–139.
  12. Понкевич В.А. Исследование параллельной работы источников распределенной генерации с асинхронными генераторами на основе тиристорных регуляторов напряжения, работающих в режиме инвертора // Повышение эффективности производства и использования энергии в условиях Сибири: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 26–30 апреля 2010 г.). С. 434–439.
  13. Новожилов М.А., Понкевич В.А. Малая гидроэнергетика для электроснабжения удаленных потребителей в современных условиях. Иркутск: Изд-во ИрНТУ, 2016. 168 с.
  14. Веников В.А., Худяков В.В., Анисимова Н.Д. Передача энергии переменным и постоянным током высокого напряжения. М.: Высш. шк., 1972. 368 с.

with international participation "Improving production efficiency and energy use in Siberia", Irkutsk, 26–30 April 2010]. Irkutsk, 2010, pp. 434–439. (In Russ.).

13. Novozhilov M.A., Pionkevich V.A. *Malaya gidroenergetika dlya elektroobrazovaniya udalennykh potrebitel' v sovremennykh usloviyakh* [Small hydropower for power supply of remote consumers in modern conditions]. Irkutsk: Irkutsk State Technical University Publ., 2016, 168

#### **Критерии авторства**

Пионкевич В.А. провел анализ результатов моделирования, Новожилов М.А. разработал модели, схемы и представил результаты моделирования. Авторы заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

**Новожилов Михаил Александрович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры электроснабжения  
и электротехники,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: nov@istu.edu

**Пионкевич Владимир Андреевич**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры электроснабжения  
и электротехники,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: pionkevichva@istu.edu

p. (In Russ.).

14. Venikov V.A., Hudyakov V.V., Anisimova N.D. *Peredacha energii peremennym i postoyannym tokom vysokogo napryazheniya* [AC and DC high voltage power transmission]. Moscow: Vysshaya shkola, 1972, 368 p. (In Russ.).

#### **Authorship criteria**

Penkevich V.A. carried out the analysis of the simulation results, Novozhilov M.A. has developed models, schemas, and process the simulation results. The authors declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Conflict of interests**

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

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

**Mikhail A. Novozhilov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Power Supply and Electrical Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: nov@istu.edu

**Vladimir A. Pionkevich**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Power Supply and Electrical Engineering,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: pionkevichva@istu.edu



## Моделирование работы однофазного печного трансформатора с одинаковыми вторичными обмотками

© Т.А. Новожилов\*, А.Н. Новожилов\*\*, Д.М. Рахимбердинова\*\*\*,  
О.В. Кропотин\*\*\*\*, В.А. Ткаченко\*\*\*\*\*, А.Я. Бигун\*\*\*\*\*

\*.,\*\*\*\*.,\*\*\*\*\* Омский государственный технический университет, г. Омск, Россия,

\*\*.,\*\*\* Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар, Республика Казахстан

**Резюме:** Цель – сформировать дифференциальные уравнения новой математической модели, а также системы уравнений для построения установившихся и переходных режимов работы силовых трансформаторов (однофазных с одинаковыми вторичными обмотками). Такие трансформаторы широко используются в качестве печных (на ферросплавном производстве и в металлургии), для сохранности от коротких замыканий внедряют токовые защиты, производство которых должно осуществляться с учетом их эксплуатационных условий в стационарных и переходных режимах активизации. Особое место среди силовых трансформаторов занимают печные однофазные трансформаторы с расщепленной вторичной обмоткой, расщепление которой представляет собой одинаковые одновитковые изолированные обмотки, выполненные шиной большого сечения. Для моделирования токов в обмотках такого трансформатора в произвольном режиме работы в наибольшей степени подходит математическая модель, дифференциальные уравнения которой составлены по второму закону Кирхгофа. При этом число уравнений в рассматриваемой математической модели будет равняться числу обмоток и их элементов у данного трансформатора, что делает невозможным использование для расчета токов в обмотках трансформатора итерационных методов, например, широко известного метода Гаусса. Это вызвано тем, что в указанных методах от погрешности расчета зависит число операций. Однако решение системы дифференциальных уравнений для многообмоточного трансформатора является достаточно сложной задачей. В связи с этим предложен метод замены всех одинаковых вторичных обмоток одной эквивалентной. С учетом этого сформированы дифференциальные уравнения новой математической схемы, а также системы уравнений для установления переходных этапов работы. Осуществлена проверка адекватности этого варианта в стационарном режиме использования путем сопоставления результатов моделирования и эксперимента.

**Ключевые слова:** однофазный печной трансформатор, математическая модель, моделирование стационарного режима работы, эксперимент

**Информация о статье:** Дата поступления 26 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 29 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Рахимбердинова Д.М., Кропотин О.В., Ткаченко В.А., Бигун А.Я. Моделирование работы однофазного печного трансформатора с одинаковыми вторичными обмотками. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):575–581. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-575-581

## Modeling operation of a single-phase furnace transformer with identical secondary windings

Timofey A. Novozhilov, Alexander N. Novozhilov, Dilara M. Rakhimberdinova,  
Oleg V. Kropotin, Vsevolod A. Tkachenko, Alexander Ya. Bigun

Omsk State Technical University, Omsk, Russia,

S. Toraihyrov Pavlodar State University, Pavlodar, Republic of Kazakhstan

**Abstract:** The purpose of the article is to form differential equations of a new mathematical model and a system of equations for constructing the steady-state and transient operating modes of single-phase power transformers with identical secondary windings. These transformers are widely used as furnace transformers in the ferroalloy industry and metallurgy. To protect the specified transformers from short circuits, current protection is introduced, which should be produced with regard to their operating conditions in stationary and transient activation modes. Single-phase furnace transformers with a split secondary winding are distinguished among power transformers. The splitting of the secondary winding is represented

by identical single-turn insulated windings performed by a bus with a large cross section. To simulate currents in the transformer windings in an arbitrary operation mode it is reasonable to use a mathematical model the differential equations of which are composed according to the second Kirchhoff law. In this case, the number of equations in this mathematical model will be equal to the number of windings and their elements in this transformer. This will make it impossible to use iterative methods (for example, the well-known Gauss method) for calculating currents in transformer windings as the number of operations in these methods depends on the calculation error. However, the solution of the system of differential equations for a multi-winding transformer is quite a challenge. In this regard, a method of replacing all identical secondary windings with one equivalent is proposed. Taking this into account, the authors have formed differential equations of a new mathematical model, as well as a system of equations for modeling steady-state and transient operation modes. The adequacy of this model has been tested in a stationary mode by comparing simulation and experimental results.

**Keywords:** single-phase furnace transformer, mathematical model, stationary mode simulation, experiment

**Information about the article:** Received February 26, 2019; accepted for publication March 29, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Novozhilov T.A., Novozhilov A.N., Rakhimberdinova D.M., Kropotin O.V., Tkachenko V.A., Bigun A.I. Modeling operation of a single-phase furnace transformer with identical secondary windings. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):575–581. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-575-581

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Традиционно для защиты силовых трансформаторов от коротких замыканий используют токовые защиты [1–3], отстройка которых невозможна без учета эксплуатационных режимов их работы. В соответствии с источниками [1–3], к эксплуатационным режимам работы относят режим нагрузки и включения трансформатора в сеть. При этом практически все время трансформатор работает в установившемся темпе. Переход из одного установившегося режима работы в другой сопровождается промежуточным процессом.

Наиболее полно в этих режимах работы момент преобразования энергии в силовых трансформаторах описывает математическая модель, дифференциальные уравнения которой составляются для фазных напряжений [4–6]. Однако такая математическая модель не позволяет строить эти процессы в однофазном печном трансформаторе с  $k$  одинаковыми вторичными обмотками.

## 2. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Как известно, силовые трансформаторы являются статическим электромагнитным устройством, с помощью которого осуществляется преобразование одной системы переменного тока в другую [7–13].

Особое место среди них занимают однофазные трансформаторы с  $k$  одинаковыми вторичными обмотками [14]. Как правило, такие трансформаторы используются в качестве печных трансформаторов на ферросплавном и металлургическом производстве. Использование  $k = 2 – 8$  одинаковых изолированных друг от друга вторичных обмоток вызвано целым рядом причин. Основной из них является сложность изготовления одной вторичной обмотки, способной обеспечить передачу электрической энергии напряжением  $U_2 = 120 – 250$  В при токе  $I_2 = 30000 – 250000$  А.

Схема печного трансформатора приведена на рис. 1, где  $u_1$  – мгновенное значение напряжения на первичной обмотке;  $i_i$  – мгновенные значения токов в обмотках;  $R_i(L_i)$  – активные сопротивления (индуктивности) обмоток;  $Z_{\pi i} = R_{\pi i} + jL_{\pi i}$  и  $Z_{\text{н}i} = R_{\text{н}i} + jL_{\text{н}i}$  – полное сопротивление короткой сети и нагрузки в виде дуги;  $R_{\pi i}(L_{\pi i})$  и  $R_{\text{н}i}(L_{\text{н}i})$  – активные сопротивления (индуктивности) короткой сети и нагрузки. При этом для первичной обмотки  $i = 1$ , а для второй вторичных обмоток  $i = 2 – 5$ .

В произвольном режиме работы процесс преобразования энергии в однофазных трансформаторах с  $k$  вторичными обмотками можно описать с помощью математической модели, дифференциальные урав-



нения которой составляются с учетом схемы на рис. 1 [4–7, 9]. Если принять у такого трансформатора  $k = 4$ , то дифференциальные уравнения этой модели будут иметь следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + d\psi_1 / dt; \\ 0 &= (R_2 + R_{2л} + R_{2н} + L_{2л} + L_{2н}) i_2 + d\psi_2 / dt; \\ 0 &= (R_3 + R_{3л} + R_{3н} + L_{3л} + L_{3н}) i_3 + d\psi_3 / dt; \\ 0 &= (R_4 + R_{4л} + R_{4н} + L_{4л} + L_{4н}) i_4 + d\psi_4 / dt; \\ 0 &= (R_5 + R_{5л} + R_{5н} + L_{4л} + L_{4н}) i_5 + d\psi_5 / dt. \end{aligned} \right\} (1)$$

В соответствии с источником [4], в этой системе уравнений потокосцепления обмоток определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \psi_1 &= L_{11} i_1 + L_{12} i_2 + L_{13} i_3 + L_{14} i_4 + L_{15} i_5; \\ \psi_2 &= L_{21} i_1 + L_{22} i_2 + L_{23} i_3 + L_{24} i_4 + L_{25} i_5; \\ \psi_3 &= L_{31} i_1 + L_{32} i_2 + L_{33} i_3 + L_{34} i_4 + L_{35} i_5; \\ \psi_4 &= L_{41} i_1 + L_{42} i_2 + L_{43} i_3 + L_{44} i_4 + L_{45} i_5; \\ \psi_5 &= L_{51} i_1 + L_{52} i_2 + L_{53} i_3 + L_{54} i_4 + L_{55} i_5. \end{aligned} \right\} (2)$$

Согласно исследованным источникам [4–7], расчет индуктивных сопротивлений обмоток трансформатора сложен. Но его можно упростить, если считать, что сердечник трансформатора ненасыщен, а собственное индуктивное сопротивление  $X_1$  первичной обмотки значительно превышает ее активное сопротивление  $R_1$ . В этом случае [7, 9] при известном напряжении  $U_1$ , приложенном к первичной обмотке трансформатора и токе холостого хода  $I_{xx}$ , индуктивное сопротивление

первичной обмотки и ее индуктивность  $L_1$  можно достаточно точно определить по математическим выражениям:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \dot{U}_1 / \dot{I}_{xx}, \quad X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2}, \\ L_1 &= X_1 / \omega, \quad \omega = 2\pi f, \end{aligned} \right\} (3)$$

где  $Z_1$  – полное сопротивление первичной обмотки трансформатора;  $\omega$  и  $f$  – угловая частота и частота тока в сети соответственно.

Известно [10, 11], что собственные индуктивности и взаимные индуктивности обмоток трансформатора пропорциональны квадрату их витков, т.к. числа витков у вторичных обмоток одинаковы, то их собственные индуктивности

$$L_2 = L_3 = L_4 = L_5 = L_1 (w_2 / w_1)^2, \quad (4)$$

где  $w_1$  и  $w_2$  – число витков в первичной и вторичных обмотках.

Взаимная индуктивность между первичной обмоткой и каждой из вторичных обмоток

$$\left. \begin{aligned} L_{12} &= L_{13} = L_{14} = L_{15} = L_{21} = \\ &= L_{31} = L_{41} = L_{51} = L_1 (w_2 / w_1). \end{aligned} \right\} (5)$$

Взаимная индуктивность между вторичными обмотками

$$\left. \begin{aligned} L_{23} &= L_{24} = L_{25} = L_{32} = L_{34} = \\ &= L_{35} = L_{42} = L_{43} = L_{45} = L_{52} = \\ &= L_{53} = L_{54} = L_1 (w_2 / w)^2. \end{aligned} \right\} (6)$$

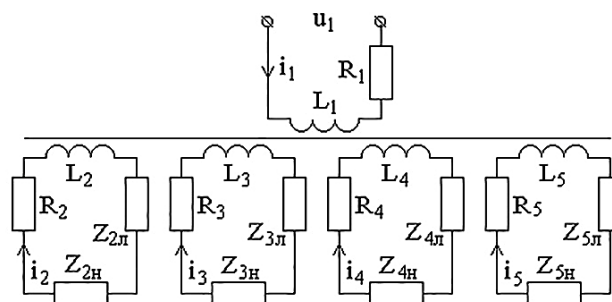


Рис. 1. Схема однофазного трансформатора с расщепленной вторичной обмоткой  
Fig. 1. Circuit of a single-phase transformer with a split secondary winding

Активное сопротивление этих обмоток

$$R_2 = R_3 = R_4 = R_5. \quad (7)$$

Действенные сопротивления первичной и вторичной обмоток проще всего получить путем их замера с помощью моста постоянного тока.

Параметры вторичных обмоток, их линии и нагрузки, а также токи одинаковы. Если принять, что в системе уравнений (1) и потокосцеплениях (2) все собственные индуктивности вторичных обмоток равны  $L_2$ , взаимные индуктивности между первичной обмоткой и каждой из вторичных обмоток равны  $L_{12}$ , взаимные индуктивности между вторичными обмотками равны  $L_{23}$ , а активные сопротивления этих обмоток равны  $R_2$ , то математическое выражение (1) легко преобразуется в систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= R_1 i_1 + d\psi_1 / dt; \\ 0 &= (R_2 + R_{2l} + R_{2n}) i_2 + \\ &+ (L_{2l} + L_{2n}) i_2 + d\psi_2 / dt. \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

в которой потокосцепления представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} \psi_1 &= L_1 i_1 + k L_{12} i_2; \\ \psi_2 &= L_{12} i_1 + L_2 i_2 + L_{23} i_2 (k - 1). \end{aligned} \quad (9)$$

Такая математическая модель проста и позволяет моделировать процессы в однофазном трансформаторе как в стационарных, так и в переходных режимах работы. При этом токи во всех обмотках трансформатора получаются в естественном виде. Что, в свою очередь, значительно облегчает анализ процессов в любых переходных моментах.

Процессы в трансформаторе в стационарном режиме моделируются с помощью системы неоднородных уравнений [5–7, 15], получаемых из (8). В этой концепции напряжения считаются синусоидальными, а оператор дифференцирования

$d/dt$  заменяется на выражение  $j\omega$ . В результате система (8) преобразуется в

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= (R_1 + X_1) i_{1n} + k X_{12} i_{2n}; \\ 0 &= X_{21} i_{1n} + (R_{\Sigma 2} + j X_{\Sigma 2}) i_{2n} + \\ &+ (X_2 + (k - 1) X_{23}) i_{2n}. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

В этом уравнении  $i_{1n}$  и  $i_{2n}$  – периодическая составляющая тока в обмотках трансформатора;  $R_{\Sigma 2} = R_2 + R_{2l} + R_{2n}$  и  $X_{\Sigma 2} = X_2 + X_{2l} + X_{2n}$ ;  $X_{m,l}$  – индуктивные сопротивления индуктивностей  $L_{m,l}$  в системе уравнений (8);  $m, l \in \mathbb{N}$ .

В переходном режиме ток в  $i$ -й обмотке трансформатора [5–7, 15] определяется как сумма тока  $i_{1n}$  периодической и  $i_{ia}$  аperiodической составляющих. Периодическая составляющая токов в обмотках трансформатора рассчитывается по (10). Аperiodическую составляющую тока  $i_{ia}$  получают путем полного решения системы однородных дифференциальных уравнений [5–7, 15]. Эту концепцию также получают из (8), приняв в ней  $u_1 = 0$ . При численном решении этой системы в ней  $dt$  и  $di$  заменяются на  $\Delta t$  и  $\Delta i$ . Затем в левую часть уравнений переносятся составляющие падений напряжений на активных и индуктивных сопротивлениях линии и нагрузки. В результате изменение токов  $\Delta i$  в элементах схемы за интервал времени  $\Delta t$  определяется путем решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} -R_1 i_{1a} \Delta t &= L_1 \Delta i_{1a} + k L_{12} \Delta i_{2a}; \\ -(R_{\Sigma 2} + L_{\Sigma 2}) i_{2a} \Delta t &= L_{12} \Delta i_{1a} + \\ &+ (L_2 + (k - 1) L_{23}) \Delta i_{2a}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Так как при моделировании переходного процесса считается, что внутри каждого временного интервала токи  $i_1 - i_5$  не меняются [4, 5], то составляющая  $L_{\Sigma 2} i_{2a}$  системы (11) будет равна нулю. С учетом этого система уравнений (11) преобразуется в



$$\left. \begin{aligned} -R_1 i_{1a} \Delta t &= L_1 \Delta i_{1a} + k L_{12} \Delta i_{2a}; \\ -R_{\Sigma 2} i_{2a} \Delta t &= L_{12} \Delta i_{1a} + \\ &+ (L_2 + (k-1) L_{23}) \Delta i_{2a}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

В соответствии с [5–7, 15], величина токов  $i_{1a}$  и  $i_{2a}$  на момент начала переходного процесса определяется типом моделируемого режима работы трансформатора, т.е. начальными условиями. Например, при моделировании режима изменения нагрузки трансформатора установившиеся значения токов до начала и по завершении переходного процесса известны. Исходя из этого, начальное значение тока апериодической составляющей в обмотках трансформатора принимается равным их разнице. При этом величина токов в  $i$ -й обмотке трансформатора интервале  $q+1$  будет определяться как

$$i_{ia,q+1} = i_{ia,q} + \Delta i_{ia,q}. \quad (13)$$

Таким образом, полученная математическая модель позволяет моделировать практически все стационарные и переход-

ные процессы в неповрежденном трехфазном трансформаторе.

Проверка адекватности этой математической модели осуществлялась в режиме нагрузки трансформатора типа ТТ-6, параметры которого приведены в таблице. Результаты моделирования и эксперимента процессов при изменяемой нагрузке приведены на рис. 2. Анализ результатов расчета и эксперимента показывает, что погрешность моделирования нагрузочного режима не превышает 10–20%, это вполне удовлетворяет требованиям релейной защиты.

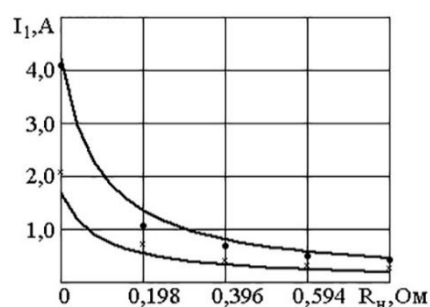


Рис. 2. Результаты моделирования и эксперимента токов в обмотках трансформатора ТТ-6 под нагрузкой  
Fig. 2. Results of simulation and an experiment of currents in TT-6 transformer windings under load

### Параметры экспериментального трансформатора ТТ-6 Parameters of the experimental transformer TT-6

| Параметры трансформатора ТТ-6                | Обозначение | Величина |
|----------------------------------------------|-------------|----------|
| Напряжение питания, В                        | $U_1$       | 394      |
| Ток холостого хода трансформатора, А         | $I_{xx}$    | 0,075    |
| Число витков в первичной обмотке             | $W_{1\phi}$ | 504      |
| Число витков во вторичных обмотках           | $W_{2\phi}$ | 5        |
| Число вторичных обмоток                      | $k$         | 4        |
| Активное сопротивление первичной обмотки, Ом | $R_{1\phi}$ | 2        |
| Активное сопротивление вторичной обмотки, Ом | $R_{2\phi}$ | 0,046    |
| Активное сопротивление короткой сети, Ом     | $R_{2H}$    | 0,047    |
| Активные сопротивления нагрузки, Ом          | $R_H$       | 0,047    |

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная математическая модель однофазного трансформатора с  $k$  вторичными обмотками позволяет моделировать токи в его обмотках в стационарных и переходных режимах работы. Погрешность

моделирования токов в обмотках однофазного трансформатора с  $k$  вторичными обмотками в эксплуатационном режиме работы с использованием этой математической модели не превышает 10–20%, что вполне удовлетворяет (поставленным изначально) требованиям релейной защиты.

**Библиографический список**

1. Засыпкин А.С. Релейная защита трансформаторов. М.: Энергоатомиздат, 1989. 240 с.
2. Hague B.E. Electromagnetic problems in electrical engineering. London: Oxford University Press, 1929.
3. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электрических систем. М.: Энергоатомиздат, 1992. 528 с.
4. Mullineux N., Reed J.R., White I.J. Current distribution in sheet and foil-wound transformers. Proc. IEE. 1969. No. 1. P. 127–129.
5. Новожилов А.Н., Горюнов В.Н., Новожилов Т.А. Защита однофазного трансформатора от витковых замыканий в обмотках на встроенных магнитных трансформаторах // Электротехника. 2018. № 2. С. 59–63.
6. Krawczyk A. Metoda obliczeń elektromagnetycznych transformatorów z uzwojeniami foliowymi. Pol. Lit. Lodzka. Praca doktorska, 1977.
7. Новожилов А.Н., Горюнов В.Н., Новожилов Т.А., Крылов И.Ю., Никитин К.И. Моделирование токов при витковом замыкании в трансформаторах руднотермических печей // Электротехника. 2013. № 4. С. 27–32.
8. Новожилов Т.А., Волгина Е.М. Область использования магнитных трансформаторов тока в электроэнергетике // Омский научный вестник. 2018. № 5 (161). С. 67–71.
9. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины.

- М.: Энергия, 1980. 909 с.
10. Кувшинов А.А., Вахнина В.В., Черненко А.Н., Рыбалко Т.А. Аналитическая модель эмиссии гармоник тока намагничивания силовым трансформатором при воздействии квазипостоянных токов // Электротехника. 2017. № 5. С. 25–31.
11. Вахнина В.В., Кузнецов В.Н., Шаповалов В.А., Самолина О.В. Моделирование процессов насыщения магнитной системы силового трансформатора при одновременном протекании по обмотке переменного и постоянного токов // Электротехника. 2017. № 4. С. 52–57.
12. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
13. Ларин В.С., Горшунов В.Ю. Особенности испытаний распределительных трансформаторов на стойкость при коротких замыканиях // Электротехника. 2018. № 10. С. 75–81.
14. Cano-Plata E.A., Ustariz-Farfan A.J. and Soto-Marin O.J. Electric Arc Furnace Model in Distribution Systems in IEEE Transactions on Industry Applications. Sept.-Oct. 2015. Vol. 51. No. 5. P. 4313–4320. DOI: 10.1109/TIA.2015.2429638
15. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. М.: Высшая школа, 1967. 775 с.

**References**

1. Zasyupkin A.S. Relay protection of transformers [Relay protection of transformers]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1989, 240 p. (In Russ.).
2. Hague B.E. Electromagnetic problems in electrical engineering. London: Oxford University Press, 1929.
3. Fedoseev A.M., Fedoseev M.A. Releynaya zashchita elektricheskikh sistem [Relay protection of electrical systems]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1992, 528 p. (In Russ.).
4. Mullineux N., Reed J.R., White I.J. Current distribution in sheet and foil-wound transformers. Proc. IEE, 1969, no. 1, pp. 127–129.
5. Novozhilov A.N., Goryunov V.N., Novozhilov T.A. Protection of a single-phase transformer against turn-to-turn short circuits in the windings on embedded magnetic transformers. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2018, no. 2, pp. 59–63. (In Russ.).
6. Krawczyk A. Metoda obliczeń elektromagnetycznych transformatorów z uzwojeniami foliowymi. Pol. Lit. Lodzka. Praca doktorska, 1977.
7. Novozhilov A.N., Goryunov V.N., Novozhilov T.A., Krylov I.Yu., Nikitin K.I. Modeling of currents in case of turn-to-turn short circuits in transformers of ore-smelting furnaces. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2013, no. 4, pp. 27–32. (In Russ.).
8. Novozhilov T.A., Volgina E.M. Application field of magnetic current transformers in the power industry. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 2018, no. 5 (161), pp. 67–71. (In Russ.).

9. Ivanov-Smolensky A.V. *Elektricheskie mashiny* [Electric machines]. Moscow: Energy Publ., 1980, 909 p. (In Russ.).
10. Kuvshinov A.A., Vahnina V.V., Chernenko A.N., Ribalko T.A. An analytical model of the emission of magnetizing-current harmonics by a power transformer under the action of quasi-direct currents. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2017, no. 5. pp. 25–31. (In Russ.).
11. Vahnina V.V., Kuznetsov V.N., Shapovalov V.A., Samolina O.V. Modeling of saturation processes of a power transformer core under simultaneous direct and alternating current passing through the winding. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2017, no. 4, pp. 52–57. (In Russ.).
12. Tikhomirov P. *Raschet transformatorov* [Calculation of transformers]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1986, 528 p. (In Russ.).
13. Larin V.S., Gorshunov V.U. Features of distribution transformer tests on resistance under short circuits. *Elektrotehnika* [Russian Electrical Engineering], 2018, no. 10, pp. 75–81. (In Russ.).
14. Cano-Plata E.A., Ustariz-Farfan A.J. and Soto-Marin O.J. Electric Arc Furnace Model in Distribution Systems in IEEE Transactions on Industry Applications, Sept.-Oct. 2015, vol. 51, no. 5, pp. 4313–4320. DOI: 10.1109/TIA.2015.2429638
15. Bessonov L.A. *Teoreticheskie osnovy elektrotehniki* [Theoretical foundations of electrical engineering]. Moscow: Higher School, 1978, 528 p. (In Russ.).



#### Критерии авторства

Новожилов Т.А., Новожилов А.Н., Рахимбердинова Д.М., Кропотин О.В., Ткаченко В.А., Бигун А.Я. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Новожилов Тимофей Александрович**,  
кандидат технических наук,  
доцент кафедры электроснабжения промышленных предприятий,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия,  
e-mail: timokvey@mail.ru

**Новожилов Александр Николаевич**,  
доктор технических наук,  
профессор кафедры электроэнергетики,  
Павлодарский государственный университет  
имени С. Торайгырова,  
140008, г. Павлодар,  
ул. Ломова, 64, Республика Казахстан,  
e-mail: novozhilova\_on@mail.ru

**Рахимбердинова Дилара Муратовна**,  
докторант,  
Павлодарский государственный университет  
имени С. Торайгырова,  
140008, г. Павлодар,  
ул. Ломова, 64, Республика Казахстан,  
e-mail: di\_lara83@mail.ru

**Кропотин Олег Витальевич**,  
доктор технических наук,  
доцент,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия,  
e-mail: krov@omgtu.ru

**Ткаченко Всеволод Андреевич**,  
магистрант,  
инженер,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия,  
e-mail: sevaatmail@gmail.com

**Бигун Александр Ярославович**,  
старший преподаватель,  
Омский государственный технический университет,  
644050, г. Омск, просп. Мира, 11, Россия,  
e-mail: barsbigun@list.ru

#### Authorship criteria

Novozhilov T.A., Novozhilov A.N., Rakhimberdinova D.M., Kropotin O.V., Tkachenko V.A., Bigun A.I. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Timofey A. Novozhilov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Department  
of Power Supply of Industrial Enterprises,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia,  
e-mail: timokvey@mail.ru

**Alexander N. Novozhilov**,  
Dr. Sci. (Eng.),  
Professor of the Department of Electric Power  
Engineering,  
S. Toraighyrov Pavlodar State University,  
64 Lomov St., Pavlodar 140008, Republic  
of Kazakhstan,  
e-mail: novozhilova\_on@mail.ru

**Dilara M. Rakhimberdinova**,  
Doctoral student,  
S. Toraighyrov Pavlodar State University,  
64 Lomov St., Pavlodar 140008, Republic of  
Kazakhstan,  
e-mail: di\_lara83@mail.ru

**Oleg V. Kropotin**,  
Dr. Sci. (Eng.),  
Associate Professor,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia,  
e-mail: krov@omgtu.ru

**Vsevolod A. Tkachenko**,  
Master's degree student,  
Engineer,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia,  
e-mail: sevaatmail@gmail.com

**Alexander Ya. Bigun**,  
Senior Lecturer,  
Omsk State Technical University,  
11 Mira pr., Omsk 644050, Russia,  
e-mail: barsbigun@list.ru



## Роль затрат на технологические инновации в росте энергоэффективности восточных регионов России

© Б.Г. Санеев, А.Д. Соколов, С.Ю. Муzychuk, Р.И. Муzychuk

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения  
Российской академии наук, г. Иркутск, Россия*

**Резюме:** Цель – разработать топливно-энергетические балансы восточных регионов России (Сибирь, Дальний Восток); с помощью перспективных топливно-энергетических балансов и статистических методов выполнить прогноз энергоемкости валового регионального продукта восточных регионов и необходимых для роста энергоэффективности затрат на технологические инновации. Исследование базируется на методах экономико-математического моделирования, системного и корреляционно-регрессионного анализов, балансовых составляющих. Разработанный авторами методический подход является развитием имеющихся теоретических знаний в данной предметной области. Составлены отчетные и прогнозные топливно-энергетические балансы восточных регионов России. С использованием системы экономико-математических моделей выполнен долгосрочный прогноз (до 2050 г.) топливно-энергетических балансов и динамики энергоемкости валового регионального продукта восточных регионов России. Для достижения расчетных уровней снижения энергоемкости валового регионального продукта выполнен прогноз роста затрат на технологические инновации в экономике этого края. Согласно выполненному исследованию, снижение энергоемкости валового регионального продукта восточных регионов России по умеренному сценарию развития экономики и топливно-энергетического комплекса к 2050 г. может достигнуть 56–75% (по сравнению с 2016 г.), для этого потребуются как структурные изменения в топливно-энергетическом балансе, так и рост затрат на технологические инновации к окончанию исследуемого периода до 4,4–4,7 млрд долл. (на 31–38%). Для более оптимистичных прогнозов развития топливно-энергетического комплекса исследуемого края (при умеренном сценарии социально-экономического развития), энергоемкость валового регионального продукта может снизиться в 1,8–2,2 раза к 2050 г. по сравнению с 2016 г., что потребует роста ежегодных затрат на технологические инновации до 4,8–5,1 млрд долл. (на 41–50%).

**Ключевые слова:** Сибирский и Дальневосточный федеральные округа, энергоемкость, топливно-энергетический баланс, моделирование, системный анализ, развитие

**Благодарности:** Исследование выполнено при финансовой поддержке проекта СО РАН № 0349-2016-0014, № гос. регистрации АААА-А17-117030310445-9.

**Информация о статье:** Дата поступления 6 марта 2019 г.; дата принятия к печати 12 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Муzychuk С.Ю., Муzychuk Р.И. Роль затрат на технологические инновации в росте энергоэффективности восточных регионов России. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):582–593. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-582-593

## The role of technological innovation costs in energy efficiency growth in Eastern regions of Russia

Boris G. Saneev, Alexander D. Sokolov, Svetlana Yu. Muzychuk, Roman I. Muzychuk

*Melentiev Energy Systems Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia*

**Abstract:** The purpose of the article is to develop fuel and energy balances of eastern regions of Russia (Siberia, the Far East); using promising fuel and energy balances and statistical methods to predict energy intensity of the gross regional product (GRP) of the eastern regions and the costs of technological innovation required for the growth of energy efficiency. The study is based on the methods of economic and mathematical modeling, system analysis, correlation and regression analysis, balance methods. The methodical approach developed by the authors develops already existing theoretical knowledge in this subject area. Reporting and forecasting fuel and energy balances of Russian eastern regions have been compiled. A long-term forecast (for the period up to 2040) of fuel and energy balances and GRP energy intensity dynamics in the eastern regions of Russia have been fulfilled using the system of economic and mathematical models. To achieve the calculated levels of reducing the GRP energy intensity, a forecast of the increase in the technological innovation costs

in the economy of this region has been made. The conducted study implies that GRP energy intensity in the eastern regions of Russia according to a moderate development scenario can be reduced by 56–75% (as compared with 2016). It will require both structural changes in the fuel and energy balance and an increase in the cost of technological innovations by the end of the period under investigation up to 4.4–4.7 billion dollars (by 31–38%). In the case of more optimistic development forecasts for the fuel and energy complex of the studied region (under the moderate scenario of socio-economic development), the GRP energy intensity may decrease by 1.8–2.2 times by 2050 as compared with 2016, which will require the growth of annual costs of technological innovations up to 4.8–5.1 billion dollars (by 41–50%).

**Keywords:** Siberian and Far Eastern Federal districts, energy intensity, fuel and energy balance, modeling, system analysis, development

**Acknowledgements:** The study was carried out with the financial support of the project by the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences no. 0349-2016-0014, state registration no. AAA 17-117030310445-9.

**Information about the article:** Received March 6, 2019; accepted for publication April 12, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Saneev B.G., Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Muzychuk R.I. The role of technological innovation costs in energy efficiency growth in Eastern regions of Russia. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):582–593. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-582-593

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Значение восточного направления в экономической и энергетической политике России с течением времени все более возрастает. В этих условиях экономико-математическое моделирование процессов развития топливно-энергетического комплекса (ТЭК) восточных регионов России (Сибирь и Дальний Восток) является эффективным способом его углубленного изучения. Наиболее объективно сложившуюся в ТЭК страны и ее регионов ситуацию можно увидеть из сводных топливно-энергетических балансов (ТЭБ), объединяющих в одной таблице (через калорийные эквиваленты топлива<sup>1</sup>) потоки всех видов топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Анализ ретроспективных (за прошедшие годы) ТЭБ позволяет выявить имеющиеся проблемы, связанные с использованием топливно-энергетических ресурсов, для этого на базе ТЭБ

рассчитываются показатели энергоэффективности: энерго-, электро-, теплоемкость валового внутреннего (регионального) продукта (ВВП/ВРП), удельные расходы топлива на производство энергоносителей, коэффициенты полезного использования топлива в энергетике, в конечном потреблении и другие более частные показатели. На базе сравнительного анализа полученных показателей с мировыми и российскими аналогами делаются выводы о состоянии энергоэффективности в стране и данном конкретном регионе.

Проблема роста энергоэффективности является одной из важнейших для российской экономики, наблюдается значительное отставание России в этой сфере от ведущих развитых стран мира<sup>2</sup>. Правительством нашей страны принимаются активные меры по исправлению этой ситуации, разработан ряд законодательных актов, ужесточающих нерациональное использование

<sup>1</sup>Калорийный эквивалент топлива - это коэффициент перевода из натуральных единиц измерения в условное топливо, представляет собой отношение теплопроизводительности данного вида топлива к условному топливу с калорийностью 7000 ккал/кг. Калорийные эквиваленты для различных топлив установлены правительством / The caloric fuel equivalent is a conversion factor from the natural units of measurement to the equivalent fuel. It is the ratio of the heat output of this type of fuel and the equivalent fuel with the calorific value of 7000 kcal / kg. Caloric equivalents for various fuels are set by the government.

<sup>2</sup>По данным международного энергетического агентства, энергоёмкость ВВП РФ (по паритету покупательной способности) в 3,3 раза превышает энергоёмкость ВВП Великобритании - в 2,6 раза, Германии - в 2,3 раза, Японии - в 1,8 раза, США - в 1,4 раза, Китая и Канады - в 1,3 раза./ According to the International Energy Agency, the energy intensity of Russian GDP (in terms of purchasing power parity) is by 2,6 times higher than the energy intensity of British GDP, Germany – by 2.3 times, Japan – by 1.8 times, the United States - by 1.4 times, China and Canada – by 1.3 times.



топливно-энергетических ресурсов. Восточные регионы по ряду показателей энергоэффективности отстают даже от среднероссийских показателей, что и обуславливает актуальность выполняемого исследования.

Рост энергоэффективности является значительным ресурсом социально-экономического развития, который может обеспечить увеличение энергопотребления с теми же или чуть большими объемами производства топливно-энергетических ресурсов. Это позволит экономить существенное количество материальных, финансовых, трудовых ресурсов, требуемых на производство различных видов продукции (в том числе и энергетической). Для населения важен и тот факт, что снижение энерго-, топливопотребления на производстве и в быту позволит сократить выбросы вредных веществ и снизить вредное влияние антропогенного фактора на экологию, что создаст более благоприятные условия для жизни, а это немаловажно, поскольку в восточных регионах страны большинство промышленных центров характеризуются как экологически неблагоприятные. На уровне Правительства Российской Федерации и Министерства энергетики принята и действует Государственная программа «Энергоэффективность и развитие энергетики», целью которой является «надежное обеспечение страны топливно-энергетическими ресурсами, повышение эффективности их использования и снижение антропогенного воздействия ТЭК на окружающую среду»<sup>3</sup>.

Комплексный энергэкономический анализ на основе ТЭБ позволяет оценить размеры потребления ТЭР по различным направлениям экономической деятельности и эффективность их использования, определить объемы потерь энергоресурсов, потенциал энергосбережения и основные направления, позволяющие повысить энергоэффективность.

Выработка рекомендаций для более эффективного использования ТЭР на базе комплексного энергэкономического ана-

лиза может быть одним из механизмов реализации государственной энергетической политики, поскольку осуществляя эти рекомендации, исполнительные органы власти имеют возможность принимать научно обоснованные управленческие решения.

## 2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данном исследовании для оценки энергоэффективности восточных регионов России с помощью созданного авторами модельного инструментария разрабатываются топливно-энергетические балансы (ретроспективные и прогнозные). С использованием статистических методов исследования определяются наиболее значимые связи и взаимозависимости между энергоемкостью ВРП восточных регионов и разработками ретроспективных топливно-энергетических балансов, а также между энергоемкостью ВРП и объемами затрат на технологические инновации (оцененными на базе статистической информации). Полученные зависимости (уравнения) с помощью прогнозных ТЭБ позволяют выполнить прогноз энергоемкости ВРП восточных регионов и необходимых для роста энергоэффективности затрат на технологические инновации. Это имеет практическое значение для государственного регулирования энергетической политикой, поскольку органы управления могут получить представление о количестве финансовых средств, необходимых для осуществления планового снижения прогнозных индикаторов энергоэффективности, заложенных в государственных программах.

## 3. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе исследований использовались статистические данные о производстве и потреблении топливно-энергетических ресурсов в восточных регионах, их ввозе и вывозе (информация Росстата). Для энергэкономического анализа состояния региональных ТЭК применялся балансовый

<sup>3</sup>Энергоэффективность и развитие энергетики: государственная программа РФ № 321 от 15.04.2014 г. / Energy efficiency and energy sector development: state program of the Russian Federation No. 321 of April 15, 2014.

метод [1–19], основанный на разработке обобщающих топливно-энергетических балансов, от добычи (производства) топливно-энергетических ресурсов до их конечного потребления<sup>4</sup>. Топливо-энергетический баланс служит основной информационной базой для определения показателей энергоэффективности экономики, включая ТЭК и его отрасли. Авторами создан модельно-компьютерный инструментарий для оценки энергоэффективности восточных регионов России, ее прогнозирования и определению количества затрат на технологические инновации<sup>5</sup>, необходимого для заданного снижения энергоемкости ВРП [20, 21]. Предлагаемый методический подход основан на принципах системного анализа, методах экономико-математического моделирования, балансовых и индикативных методах.

Для сопоставления полученных в результате исследований показателей энергоэффективности восточных регионов с соответствующими показателями других стран мира расчеты выполнялись в международных единицах: ВРП восточных регионов переведен из рублей в доллары США (по паритету покупательной способности), статьи топливно-энергетического баланса – из тонн условного топлива (т у.т.) в тонны нефтяного эквивалента (т н.э.)<sup>6</sup>. Сравнительный анализ позволяет определить, насколько энергоэффективность восточных регионов страны отстает от российских и международных показателей, а также наме-

тить основные направления решения существующей проблемы.

Научная новизна предлагаемого авторами методического подхода состоит в развитии теоретических положений, методического и информационного обеспечения процессов исследования и заключается в комплексном применении ряда научных методов для выполнения энергоэкономического анализа, выработке обоснований по повышению энергоэффективности восточных регионов России и оценке необходимых для этого инвестиций.

Модельно-компьютерный инструментарий включает систему моделей и базы данных для разработки региональных ТЭБ, индикативные методы оценки энергоэффективности экономики, методы статистического анализа для выявления взаимосвязей энергоемкости ВРП и статей баланса, а также связи затрат на технологические инновации и энергоемкости ВРП.

Разработка ретроспективных ТЭБ начинается с составления отчетных однопродуктовых балансов отдельных видов ТЭР (угля, нефти, нефтепродуктов, газа, электроэнергии, теплоты и др.) в натуральных единицах (тонны, м<sup>3</sup>, кВт·ч, Гкал) которые через калорийные эквиваленты переводятся в единицы условного топлива и сводятся в единые региональные ТЭБ.

На основе сводных ТЭБ проводится энергоэкономический анализ восточных регионов. Рассчитываются основные показате-

<sup>4</sup>Разработка ТЭБ осуществляется в соответствии с пунктом 10 части 2 статьи 4 Федерального закона от 27 июля 2010 г. № 190-ФЗ «О теплоснабжении». Приказом Минэнерго России № 600 от 14 декабря 2011 г. утвержден «Порядок составления топливно-энергетических балансов субъектов Российской Федерации, муниципальных образований»./ Development of the fuel and energy balance is carried out in accordance with the clause 10 of part 2 of article 4 of the Federal Law of July 27, 2010 No. 190-FZ "On Heat Supply". The Order of the Ministry of Energy of Russia No. 600 of December 14, 2011 has approved the "Procedure for drawing up the fuel and energy balances of the constituent entities of the Russian Federation and municipalities".

<sup>5</sup>Затраты на технологические инновации представляют собой выраженные в денежной форме фактические расходы, связанные с осуществлением разных видов инновационной деятельности, выполняемой в масштабе предприятия (отрасли, региона, страны) / The costs of technological innovation are cash-based actual costs associated with the implementation of various types of innovation carried out by the enterprise (industry, region, country).

<sup>6</sup>В России за единицу условного топлива (у.т.) принимается теплотворная способность 1 кг каменного угля = 29,3 МДж или 7000 ккал. Международное энергетическое агентство приняло за единицу нефтяной эквивалент, обычно обозначаемый аббревиатурой ТОЕ (англ. Tonne of oil equivalent). Одна тонна нефтяного эквивалента равняется 41,868 ГДж./ In Russia, the calorific value of 1 kg of hard coal = 29.3 MJ or 7000 kcal is taken as the unit of the fuel equivalent. The International Energy Agency has taken the oil equivalent commonly abbreviated as TOE (Tonne of oil equivalent), as a unit. One tonne of oil equivalent equals 41.868 GJ.



тели энергоэффективности: электро-, тепло-, энергоемкость ВРП, удельные расходы ТЭР на производство электрической и тепловой энергии, потери ТЭР при производстве и потреблении. Выполняются стоимостные оценки ТЭБ, определяются полные затраты в энергоснабжение потребителей.

Анализ ретроспективных балансов позволяет выявить основные особенности ТЭК, присущие восточным регионам и определить основные проблемы его развития, учет которых позволит повысить обоснованность долгосрочных прогнозов.

Для получения научно обоснованных прогнозных ТЭБ используется система моделей развития региональных ТЭК, состоящая из оптимизационных и имитационных моделей: ТЭК страны, экономики страны и регионов, внешних связей регионов и других, разработанных в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева Сибирского отделения Российской академии наук (отдел комплексных и региональных проблем энергетики) моделей [22].

С помощью статистических методов разрабатываются уравнения множественной регрессии энергоемкости ВРП восточных регионов и затрат на технологические инновации. Эти уравнения позволяют выполнить прогнозы динамики этих показателей в зависимости от изменения управляемых переменных. Для построения уравнения множественной линейной регрессии используются встроенные функции «Анализ данных/Регрессия» программного пакета *MS Excel*.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием созданного авторами модельно-компьютерного инструментария [16–18] разработаны ретроспективные топливно-энергетические балансы восточных регионов России с 2005 по 2016 гг. На их основе рассчитана энергоемкость ВРП как отношение валового потребления ТЭР к объему ВРП (табл. 1).

Сравнительный анализ энергоемкости ВРП восточных регионов России с данными Международного энергетического

агентства (табл. 2) показал, что в исследуемых регионах имеется значительное отставание этого показателя от развитых стран мира и существует большой потенциал роста энергоэффективности как за счет структурных изменений в экономике, так и за счет технологических факторов.

В рамках исследования выполнен долгосрочный прогноз динамики энергоемкости ВРП восточных регионов России. Для этого проведен анализ зависимости изменения энергоемкости ВРП от изменения величин наиболее коррелируемых производственных показателей ТЭБ и величины ВРП за период 2005–2016 гг. (см. табл. 1) и разработано уравнение энергоемкости (1):

$$Y = 0,401 + 0,0025 \times X_1 - 0,0024 \times X_2 - 0,00097 \times X_3, \quad (1)$$

где  $Y$  – энергоемкость ВРП;  $X_1$  – производство первичных ТЭР;  $X_2$  – вывоз ТЭР;  $X_3$  – ВРП в ценах 2016 г.

Для разработки уравнения (1) использован метод наименьших квадратов, позволяющий определить аналитическое выражение взаимосвязи результативного признака (в данном случае энергоемкости ВРП) и его факторов (производства первичных ТЭР, вывоза ТЭР, объема ВРП).

Для оценки достоверности и статистической значимости коэффициентов уравнения (1) используются  $t$ -критерий Стьюдента и критерий Фишера ( $p$ -значение). Расчетные значения  $t$ -критерия переменных  $Y$  и  $X_1 \div X_3$  сравниваются с табличным значением ( $t_{\text{табл}} = 1,725$ ), и при  $|t_{\text{расч}}| > t_{\text{табл}}$  коэффициент является статистически значимым. В случае выполнения условия  $p < 0,05$  соответствующая независимая переменная  $X_i$  значимо влияет на зависимую переменную  $Y$  и может быть включена в состав уравнения. Для всех коэффициентов уравнения (1) выполняются вышеперечисленные условия, что характеризует все объясняющие переменные  $X_i$  как статистически значимые (табл. 3).

Коэффициент корреляции уравнения (1) 0,998 показывает наличие сильной статистической связи между переменными и

Таблица 1

Динамика ретроспективных показателей для формирования долгосрочного прогноза энергоемкости валового регионального продукта восточных регионов России

Table 1

Dynamics of retrospective indicators for the formation of a long-term forecast of GRP energy intensity in the eastern regions of Russia

| Показатель                                                                       | Год   |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                                                  | 2005  | 2006  | 2007  | 2008  | 2009  | 2010  | 2011  | 2012  | 2013  | 2014  | 2015  | 2016  |
| Производство первичных ТЭР, млн т н.э.                                           | 150,0 | 157,1 | 172,0 | 176,5 | 184,0 | 224,1 | 238,8 | 256,8 | 262,9 | 263,9 | 273,8 | 293,9 |
| Вывоз ТЭР, млн т н.э.                                                            | 35,7  | 40,5  | 55,1  | 60,4  | 70,7  | 113,0 | 129,2 | 141,9 | 151,1 | 154,2 | 164,9 | 185,9 |
| Валовое потребление ТЭР, млн т н.э.                                              | 123,8 | 125,6 | 125,4 | 124,5 | 121,8 | 119,6 | 118,3 | 123,3 | 119,9 | 117,5 | 116,0 | 114,4 |
| ВРП (по паритету покупательной способности) в ценах 2016 г., млрд долл.          | 334,1 | 353,8 | 382,6 | 397,4 | 388,7 | 409,0 | 429,9 | 436,1 | 440,7 | 448,2 | 445,7 | 447,0 |
| Затраты на технологические инновации в ценах 2016 г., млрд долл.                 | 1,8   | 2,0   | 2,4   | 2,5   | 2,6   | 2,7   | 2,7   | 2,8   | 3,0   | 3,0   | 3,1   | 3,4   |
| Энергоемкость ВРП (по паритету покупательной способности), т н.э./тыс. долл. США | 0,37  | 0,35  | 0,33  | 0,31  | 0,31  | 0,29  | 0,28  | 0,28  | 0,27  | 0,26  | 0,26  | 0,26  |

Примечание. Источник - рассчитано авторами на основе данных Росстата / Note. The source is authors' calculations based on the Rosstat data.

Таблица 2

Энергоемкость валового внутреннего продукта\* (по паритету покупательной способности), т н.э./тыс. долл. США, 2016 г.

Table 2

GDP\* energy intensity (in terms of purchasing power parity), tons of oil equivalent / thous. USD, 2016

| Восточные регионы России | Россия | Канада | Китай | США  | Япония | Великобритания | Страны мира, в целом |
|--------------------------|--------|--------|-------|------|--------|----------------|----------------------|
| 0,26                     | 0,23   | 0,18   | 0,15  | 0,13 | 0,09   | 0,07           | 0,13                 |

Примечание. \*Для восточных регионов России рассчитана энергоемкость ВРП. Источник – данные Международного энергетического агентства и расчеты авторов / Note. \*GRP energy intensity is calculated for the eastern regions of Russia. The source is International Energy Agency data and authors' calculations.



Таблица 3

Анализ коэффициентов уравнения регрессии (1)

Table 3

Analysis of regression equation coefficients (1)

| Показатель     | Коэффициенты | Стандартная ошибка, % | t-статистика | p-значение            |
|----------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| Y              | 0,40148      | 0,05301               | 7,57         | $6,46 \times 10^{-5}$ |
| X <sub>1</sub> | 0,00251      | 0,00049               | 5,13         | $9,0 \times 10^{-4}$  |
| X <sub>2</sub> | -0,00240     | 0,00045               | -5,34        | $6,92 \times 10^{-4}$ |
| X <sub>3</sub> | -0,00097     | 0,00007               | -13,88       | $7,03 \times 10^{-7}$ |

Примечание. Источник – оценки авторов / Note. The source is authors' estimates.

энергоемкостью ВРП. Коэффициент детерминации показывает степень точности описания уравнением (1) динамики энергоемкости ВРП, которая на 99,5% объясняется действием трех факторных переменных  $X_i$  и на 0,5% действием других случайных величин, что говорит о высокой точности аппроксимации. Стандартная ошибка уравнения (1) составила допустимую величину 0,003%. Достоверность полученного уравнения (1) оценивается по уровню значимости критерия Фишера, где  $p = 3,57 \cdot 10^{-10} < 0,05$ , что подтверждает адекватность описания связи энергоемкости ВРП восточных регионов и объясняющих переменных.

С помощью уравнения (1) выполнен прогноз энергоемкости ВРП восточных регионов до 2050 г. В процессе исследований учтена реализация инновационных мероприятий, позволяющих снизить нерациональное потребление ТЭР. Для выполнения прогностических расчетов приняты следующие условия:

- в соответствии с ранее выполненными авторами прогнозами, производство первичных ТЭР в восточных регионах увеличится по сравнению с 2016 г.: в умеренном сценарии к 2030 г. – на 20–30%, к 2040 г. – на 30–45%, а к 2050 г. – на 48–60% (табл. 4), в базовом сценарии к 2030 г. – на 50–70%, к 2040 г. – в 1,7–2 раза, а к 2050 г. – в 2–2,3 раза (табл. 5);

- вывоз ТЭР возрастет по сравнению с 2016 г.: в умеренном сценарии к 2030 г. – на 33–44%, к 2040 г. – на 44–60%, а к 2050 г. – на 65–80% (табл. 4), в базовом сценарии к 2030 г. – в 1,7–2 раза, к 2040 г. – в 1,9–2,3 раза, а к 2050 г. – в 2,4–2,7 раза (табл. 5);

- ВРП увеличится по сравнению с 2016 г.: в умеренном сценарии к 2030 г. – на 15–25%, к 2040 г. – на 25–35%, а к 2050 г. – на 35–45% (табл. 4), в базовом сценарии к 2030 г. – на 26–36%, а к 2040 г. – в 1,5–1,6 раза, а к 2050 г. – в 1,6–1,7 раза (табл. 5).

Среднегодовые темпы роста ВРП восточных регионов за период 2016–2050 гг. в умеренном сценарии развития ТЭК составят 100,9–101,1%, в базовом сценарии – 101,4–101,6%. Это соответствует умеренному сценарию развития экономики восточных регионов.

Подставляя исходные параметры в уравнение (1), получим прогнозные значения энергоемкости ВРП, которая снизится по сравнению с 2016 г.: в умеренном сценарии на 20–38% к 2030 г., на 42–52% к 2040 г. и на 56–75% к 2050 г. (табл. 4), а в базовом сценарии – на 22–43% к 2030 г., на 54–85% к 2040 г. и в 1,8–2,2 раза к 2050 г. (табл. 5).

Достижение динамики снижения энергоемкости ВРП, представленной в табл. 4 и 5, возможно при росте затрат на технологические инновации в восточных регионах России. Для определения взаимосвязи инноваций и энергоемкости ВРП разработано уравнение регрессии (2):

$$Y = 0,505 - 0,077 \times X_4, \quad (2)$$

где  $X_4$  – затраты на технологические инновации.

Оценка достоверности и статистической значимости коэффициентов переменных и уравнения регрессии (2) представлена в табл. 6. Объясняющая переменная  $X_4$ , включенная в модель, согласно  $t$ -критерия

рию Стюдента и критерию Фишера ( $p$ -значение), является статистически значимой.

Коэффициент корреляции уравнения (2) 0,964 показал наличие сильной статистической связи между переменными и энергоемкостью ВРП. Точность аппроксимации уравнения (2) достаточно высокая, коэффициент детерминации 92,9%, стандартная ошибка является допустимой величиной –

0,0106%. Достоверность уравнения регрессии (2) по критерию Фишера

$$p = 1,19 \cdot 10^{-7} < 0,05$$

подтверждает адекватность описания связи энергоемкости ВРП восточных регионов и затрат на технологические инновации.

При известных значениях энергоемкости ВРП (табл. 3, 4) из уравнения (2) определяются значения необходимых затрат на

**Таблица 4**

**Прогноз энергоемкости валового регионального продукта восточных регионов\* (умеренный сценарий)**

**Table 4**

**GRP energy intensity forecast for the eastern regions\* (moderate scenario)**

| Год  | Производство первичных ТЭР, млн т н.э. |       | Вывоз ТЭР, млн т н.э. |       | ВРП**, млрд долл. |       | Энергоемкость ВРП**, т н.э./тыс. долл. |      |
|------|----------------------------------------|-------|-----------------------|-------|-------------------|-------|----------------------------------------|------|
| 2016 | 293,9                                  |       | 185,9                 |       | 447,0             |       | 0,26                                   |      |
| 2020 | 317,5                                  | 324,5 | 206,4                 | 217,4 | 461,8             | 465,2 | 0,25                                   | 0,24 |
| 2025 | 339,0                                  | 357,5 | 227,2                 | 243,1 | 491,8             | 507,1 | 0,23                                   | 0,22 |
| 2030 | 352,7                                  | 381,4 | 239,8                 | 263,1 | 514,1             | 558,8 | 0,21                                   | 0,18 |
| 2035 | 366,8                                  | 402,8 | 252,7                 | 279,9 | 536,5             | 581,2 | 0,19                                   | 0,18 |
| 2040 | 381,4                                  | 425,5 | 265,0                 | 297,9 | 558,8             | 603,5 | 0,18                                   | 0,17 |
| 2045 | 406,0                                  | 441,0 | 278,6                 | 311,5 | 595,2             | 615,7 | 0,17                                   | 0,16 |
| 2050 | 434,0                                  | 469,0 | 308,0                 | 334,6 | 605,5             | 648,6 | 0,16                                   | 0,15 |

Примечание: \*левая граница диапазона соответствует более низким показателям, правая – более высоким, но в границах умеренного сценария развития экономики и ТЭК восточных регионов России; \*\*ВРП в ценах 2016 г. / Note: \* the left boundary of the range corresponds to lower indices, the right boundary corresponds to higher ones, but within the limits of the moderate development scenario of economy and the fuel and energy complex in the eastern regions of Russia; \*\* GRP in 2016 prices.

**Таблица 5**

**Прогноз энергоемкости валового регионального продукта восточных регионов\* (базовый сценарий)**

**Table 5**

**GRP energy intensity forecast for the eastern regions\* (basic scenario)**

| Год  | Производство первичных ТЭР, млн т н.э. |       | Вывоз ТЭР, млн т н.э. |       | ВРП**, млрд долл. |       | Энергоемкость ВРП**, т н.э./тыс. долл. |      |
|------|----------------------------------------|-------|-----------------------|-------|-------------------|-------|----------------------------------------|------|
| 2016 | 293,9                                  |       | 185,9                 |       | 447,0             |       | 0,26                                   |      |
| 2020 | 329,6                                  | 348,2 | 220,9                 | 233,3 | 481,3             | 519,4 | 0,23                                   | 0,21 |
| 2025 | 399,2                                  | 425,3 | 279,4                 | 301,9 | 522,1             | 563,5 | 0,23                                   | 0,20 |
| 2030 | 440,9                                  | 499,7 | 313,0                 | 369,7 | 563,0             | 607,6 | 0,21                                   | 0,18 |
| 2035 | 470,8                                  | 561,8 | 329,6                 | 415,7 | 616,8             | 661,4 | 0,19                                   | 0,17 |
| 2040 | 500,6                                  | 587,9 | 350,4                 | 435,1 | 670,6             | 715,3 | 0,17                                   | 0,14 |
| 2045 | 567,0                                  | 630,0 | 415,1                 | 472,5 | 691,7             | 738,9 | 0,16                                   | 0,13 |
| 2050 | 595,0                                  | 665,0 | 441,0                 | 507,5 | 718,4             | 759,4 | 0,14                                   | 0,12 |

Примечание: \*левая граница диапазона соответствует более низким показателям, правая – более высоким, но в границах умеренного сценария развития экономики и базового сценария развития ТЭК восточных регионов России; \*\*ВРП в ценах 2016 г. / Note: \* left boundary of the range corresponds to lower indices, the right boundary corresponds to the higher ones but within the limits of the moderate development scenario of economy and the basic scenario of the fuel and energy complex development in the eastern regions of Russia; \*\* GRP in 2016 prices



Таблица 6

Анализ коэффициентов уравнения регрессии (2)

Table 6

Analysis of regression equation coefficients (2)

| Показатель     | Коэффициенты | Стандартная ошибка, % | t-статистика | p-значение             |
|----------------|--------------|-----------------------|--------------|------------------------|
| Y              | 0,5052       | 0,017796              | 28,3894      | $1,21 \times 10^{-11}$ |
| X <sub>4</sub> | -0,0769      | 0,006421              | -11,9774     | $1,19 \times 10^{-07}$ |

Примечание. Источник – оценки авторов / The source is authors' estimates.

технологические инновации в восточных регионах России в сопоставимых ценах 2016 г. на период 2020–2050 гг. (рисунок).

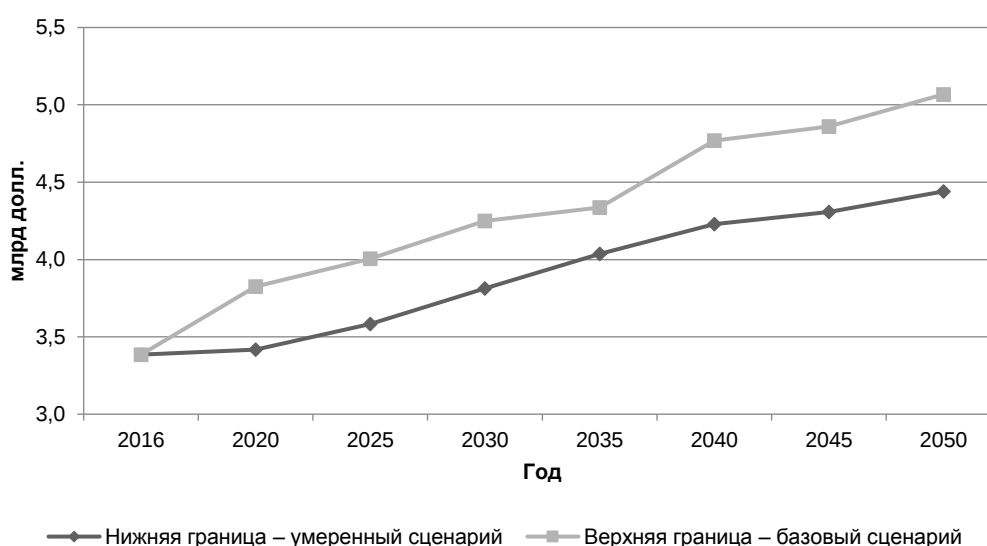
На рисунке нижняя граница расчетного диапазона соответствует нижней границе умеренного сценария развития ТЭК, верхняя – верхней границе базового сценария развития ТЭК.

Для достижения прогнозной динамики энергоемкости ВРП согласно расчетам, выполненным с использованием взаимозависимостей уравнения (2), затраты на технологические инновации в восточных регионах должны возрасти по сравнению с 2016 г. (в сопоставимых ценах): в умеренном сценарии к 2030 г. – на 13–20%, к 2040 г. – на 25–30% к 2050 г. – на 31–38%, в базовом сценарии к 2030 г. – на 16–25%, к 2040 г. – на 30–40%, к 2050 г. – на 41–50%.

В ТЭК восточных регионов затраты на технологические инновации должны

быть направлены, в первую очередь, на внедрение инновационных решений в технологические процессы ТЭС и котельных, газификацию ряда энергообъектов (где это экономически целесообразно), более полное использование вторичных энергоресурсов, сокращение потерь ТЭР. Рост энергоэффективности зависит также от реализации технологических факторов во всех сферах экономики, в том числе и жилищно-коммунальном хозяйстве, где имеется большой потенциал.

Рост энергоэффективности за счет технологических инноваций позволит снизить затраты на производство и потребление энергоресурсов, сократить потери ТЭР, что положительно отразится на социально-экономическом развитии, улучшении экологии и повышении качества жизни населения восточных регионов страны.



Прогноз затрат на технологические инновации в восточных регионах России  
Forecast of technological innovation costs in the eastern regions of Russia

## **5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

За период 2005–2016 гг. энергоемкость ВРП восточных регионов (по паритету покупательной способности, в ценах 2016 г.) снизилась на 42%. Одним из важнейших условий устойчивого социально-экономического развития является рост энергоэффективности экономики (за счет улучшения структуры ТЭБ).

Основными путями улучшения структуры ТЭБ восточных регионов являются:

- снижение в топливно-энергетическом балансе доли угля за счет роста газовой составляющей и доли возобновляемых ресурсов позволит обеспечить спрос на энергоносители с меньшими удельными расходами топлива и снизить выбросы вредных веществ;

- строительство нефте-, газоперерабатывающих заводов в регионах с крупными запасами углеводородов, что позволит производить углеводородную продукцию с более высокой добавленной стоимостью и повысить наполняемость бюджетов разных уровней;

- сокращение потерь ТЭР на всех стадиях производственного процесса;

- эффективное использование местных видов топлива и возобновляемых источников энергии для потребителей в отдаленных районах с целью повышения надежности энергоснабжения и снижения потерь

энергоносителей в сетях;

- увеличение объемов переработки угля с целью повышения качества и конкурентоспособности угольной продукции, а в отдаленной перспективе – для производства инновационных продуктов переработки.

В рамках исследования выполнен долгосрочный прогноз динамики энергоемкости ВРП восточных регионов России, который показывает, что снижение показателя по сравнению с 2016 г. по умеренному сценарию развития экономики и ТЭК может достигнуть: к 2040 г. – в 1,4–1,5 раза, а к 2050 г. – в 1,6–1,8 раза. При этом потребуются не только структурные изменения в ТЭБ, но и рост затрат на технологические инновации в экономике до 4,2–4,4 млрд долл./год к 2040 г. и до 4,4–4,7 млрд долл./год к 2050 г. Для базового сценария развития ТЭК энергоемкость ВРП восточных регионов может снизиться по сравнению с 2016 г. к 2040 г. – в 1,5–1,8 раза, а к 2050 г. – в 1,8–2,2 раза, что потребует рост затрат на технологические инновации до 4,4–4,8 млрд долл./год в 2040 г. и до 4,8–5,1 млрд долл./год в 2050 г.

Потенциальный экономический эффект от роста энергоэффективности в восточных регионах в период 2020–2050 гг. может достигнуть 170–185 млрд долл. (в ценах 2016 г.), что составляет около 5,5–6 млрд долл. ежегодно.

### **Библиографический список**

1. Мелентьев Л.А., Стырикович М.А., Е.О. Штейнгауз Е.О. Топливо-энергетический баланс СССР. М.: Госэнергоиздат, 1962. 208 с.
2. Некрасов А.С., Синяк Ю.В., Ямпольский В.А. Построение и анализ энергетического баланса. Вопросы методологии и методики. М.: Энергоатомиздат, 1974. 178 с.
3. Макаров А.А., Вигдорчик А.Г. Топливо-энергетический комплекс. Методы исследования оптимальных направлений развития. М.: Наука, 1979. 279 с.
4. Башмаков И.А. Топливо-энергетический баланс как инструмент анализа, прогноза и индикативного планирования развития энергетики // Энергетическая политика. 2007. Вып. 2. С. 16–25.
5. Галиева Т.М., Мастепанов А.М. О методологии разработки топливо-энергетических балансов // Энергетическая политика. Вып. 3. 2003. С. 21–27.
6. Чурашев В.Н., Суслов Н.И., Маркова В.М., Чернова Г.В. Топливо-энергетический баланс как инструмент анализа и прогноза взаимодействий экономики и энергетики региона // Энергетика в глобальном мире: материалы Междунар. науч.-техн. конгресса (г. Красноярск, 16–18 июня 2010 г.). Красноярск, 2010. С. 383–384.
7. Chupjatov V., Makarov A., Medvedeva E. Energy efficiency and savings in the Russia // International Journal of Global Energy. 2001. Vol. 16. No. 1–3. P. 213–225.
8. Rosenfeld A.H. Real Prospects for Energy Efficiency in the United States. London: The National Academies Press, 2010. 348 p.
9. Patterson M. What is energy efficiency? // Energy Policy. 1996. Vol. 24. No. 5. P. 377–390.
10. Haas R. Energy efficiency indicators in the residential sector. Energy Policy. 1997. Vol. 25. No. 7–9. P. 789–802.



11. Solow R.M. The Economics of Resources and the Resources of Economics // American Economic Review, Paper and Proceeding. 1974. No. 2. P. 1–14.  
12. Nordhaus W.D. The Efficient Use of Energy Resources. Yale University, 1979. 183 p.  
13. Chandler M. Natural Resources as a Constraint on Economic Growth: Discussion // The American Economic Review. 1973. Vol. 63. No. 2. P. 126–128.  
14. Lakshmanan T.R., Ratick S. Integrated Models for Economic-Energy-Environmental Impact Analysis // Economic-Environmental-Energy Interactions: Modeling and Policy Analysis, 1980. P. 7–39.  
15. Herring H., Sorrel S., Macmillan H.P. Energy Efficiency and Sustainable Consumption: The Rebound Effect. 2009. 272 p.  
16. Oikonomou V., Becchis F., Steg L., Russolillo D. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making // Energy Policy. 2009. Vol. 37. P. 4787–4796.  
17. Taib S., Al-Mofleh A. Tools and Solution for Energy Management // EnergyEfficiency – The Innovative Ways for Smart Energy, the Future Towards Modern Utilities. October 17, 2012. [Электронный ресурс]. URL: [http://www.intechopen.com/books/energy-efficiencythe-](http://www.intechopen.com/books/energy-efficiencythe-innovative-ways-for-smart-energy-the-future-towards-modern-utilities/tools-and-solution-for-energy-management)

[innovative-ways-for-smart-energy-the-future-towards-modern-utilities/tools-and-solution-for-energy-management](http://www.intechopen.com/books/energy-efficiencythe-innovative-ways-for-smart-energy-the-future-towards-modern-utilities/tools-and-solution-for-energy-management) (12.02.2019).  
18. Kepplinger D. Templ M. Upadhyaya S. Analysis of energy intensity in manufacturing industry using mixed – effects models // Energy. 2013. Vol. 59. P. 754–763.  
19. Jorge R., Mercado J. Energy intensity: A decomposition and counterfactual exercise for Latin American countries // Energy. 2014. Vol. 42. P. 161–171.  
20. Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Музычук С.Ю., Музычук Р.И. Топливо-энергетические балансы в системе комплексного исследования развития региональных ТЭК // Известия российской академии наук. Энергетика. 2011. № 2. С. 21–35.  
21. Соколов А.Д., Музычук С.Ю., Музычук Р.И. Топливо-энергетические балансы Иркутской области в натуральном и стоимостном выражении: методы разработки и основные результаты исследований // Известия ИГЭА. 2013. № 1. С. 124–129.  
22. Санеев Б.Г. Методы и модели разработки региональных энергетических программ. Новосибирск: Наука, 2003. 140 с.

## References

1. Melentiev LA, Styrikovich MA, E.O. Steinghaus E.O. *Toplivno-energeticheskiy balans SSSR* [Fuel and energy balance of the USSR]. Moscow: State energy publishing house, 1962, 208 p. (In Russ.).  
2. Nekrasov A.S., Sinyak Yu.V., Yanpolsky V.A. *Postroyeniye i analiz energeticheskogo balansa. Voprosy metodologii i metodiki* [Construction and analysis of energy balance. Questions of methods and methodology]. Moscow: Energoatomizdat, publishing house, 1974, 178 p. (In Russ.).  
3. Makarov A.A., Vigdorchik A.G. *Toplivno-energeticheskiy kompleks. Metody issledovaniya optimal'nykh napravleniy razvitiya* [Fuel and energy complex. Research methods of optimal development directions]. Moscow: Nauka Publishing house, 1979, 279 p. (In Russ.).  
4. Bashmakov I.A. Fuel and energy balance as a tool for analysis, forecasting and indicative planning of energy development. *Energeticheskaya politika* [The Energy Policy], 2007, no. 2, pp. 16–25. (In Russ.).  
5. Galieva T.M., Masterpanov A.M. On the methodology of fuel and energy balance development. *Energeticheskaya politika* [The Energy Policy], 2003, no. 3, pp. 21–27. (In Russ.).  
6. Churashev V.N., Suslov N.I., Markova V.M., Chernova G.V. *Toplivno-energeticheskiy balans kak instrument analiza i prognoza vzaimodeystviy ekonomiki i energetiki regiona* [Fuel and energy balance as a tool for the analysis and forecast of regional economy and energy sector interactions]. *Materialy mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo kongressa "Energetika v global'nom mire"* [Materials of the International scientific and technical Congress "Energy industry in the global world" Krasnoyarsk, 16–18 June 2010]. Krasnoyarsk, 2010,

pp. 383–384. (In Russ.).  
7. Chupjatov V., Makarov A., Medvedeva E. Energy efficiency and savings in the Russia. *International Journal of Global Energy*, 2001, no. 16 (1-3), pp. 213–225.  
8. Rosenfeld A. H. Real Prospects for Energy Efficiency in the United States, Chaired by Lester Lave and Maxine Savitz, America's Energy Future Panel on Energy Efficiency Technologies; National Academy of Sciences, Academy of Engineering; The National Academies Press, 2009, 203 p.  
9. Patterson M. What is energy efficiency? *Energy Policy*, 1996, no. 24(5), pp. 377–390.  
10. Haas R. Energy efficiency indicators in the residential sector. *Energy Policy*, 1997, no. 25(7-9), pp. 789–802.  
11. Solow R.M., The Economics of Resources and the Resources of Economics, American Economic Review. Paper and Proceeding, 1974, no. 2, pp. 1–14.  
12. Nordhaus W.D. The Efficient Use of Energy Resources. Yale University, 1979, 183 p.  
13. Chandler M. Natural Resources as a Constraint on Economic Growth: Discussion. The American Economic Review. 1973, no. 63(2), pp. 126–128.  
14. Lakshmanan T.R., Ratick S. Integrated Models for Economic-Energy-Environmental Impact Analysis. Economic-Environmental-Energy Interactions: Modeling and Policy Analysis, 1980, pp. 7–39.  
15. Herring H., Sorrel S., Macmillan H.P. Energy Efficiency and Sustainable Consumption: The Rebound Effect, 2009, 272 p.  
16. Oikonomou V., Becchis F., Steg L., Russolillo D. Energy saving and energy efficiency concepts for policy making. *Energy Policy*, 2009, vol. 37, pp. 4787–4796.  
17. Taib S., Al-Mofleh A. Tools and Solution for Energy Management // EnergyEfficiency — The Innovative

Ways for Smart Energy, the Future Towards Modern Utilities. October 17, 2012. Available at: <http://www.intechopen.com/books/energy-efficiencythe-innovative-ways-for-smart-energy-the-future-towards-modern-utilities/tools-and-solution-for-energy-management> (12.02.2019).

18. Kepplinger D. Templ M. Upadhyaya S. Analysis of energy intensity in manufacturing industry using mixed – effects models. *Energy*, 2013, vol. 59, pp. 754–763.

19. Jorge R., Mercado J. Energy intensity: A decomposition and counterfactual exercise for Latin American countries. *Energy*, 2014, vol. 42, pp. 161–171.

20. Saneyev B.G., Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Muzychuk R.I. Energy balances in the system of complex

studies on development of regional fuel and energy complexes. *Izvestiya rossiyskoy akademii nauk. Energetika* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Power Engineering], 2011, no. 2, pp. 21–35. (In Russ.).

21. Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Muzychuk R.I. Fuel and energy balance of the Irkutsk region in physical and value terms: development methods and main results of researches. *Izvestiya Irkutskoj gosudarstvennoj ekonomicheskoy akademii* [Izvestiya of Irkutsk State Economic Academy], 2013, no. 1, pp. 124–129. (In Russ.).

22. Saneev B.G. *Metody i modeli razrabotki regional'nyh energeticheskikh program* [Methods and models for the development of regional energy programs]. Novosibirsk: Nauka Publ., 2003, 140 p. (In Russ.).

#### **Критерии авторства**

Санеев Б.Г., Соколов А.Д., Музычук С.Ю., Музычук Р.И. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Saneev B.G., Sokolov A.D., Muzychuk S.Yu., Muzychuk R.I. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

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

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Санеев Борис Григорьевич,**

доктор технических наук, заведующий отделом, руководитель научного направления комплексных проблем энергетики и региональной энергетической политики,

Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия,  
e-mail: saneev@isem.irk.ru

##### **Boris G. Saneev,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Head of the Department, Director of the Center for Complex Issues of the Energy Sector and Regional Energy Policy,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
Siberian branch of the Russian Academy of Sciences,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
e-mail: saneev@isem.irk.ru

##### **Соколов Александр Данилович,**

доктор технических наук,  
главный научный сотрудник,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия,  
e-mail: sokolov@isem.irk.ru

##### **Alexander D. Sokolov,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Chief Researcher,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
Siberian branch of the Russian Academy of Sciences,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
e-mail: sokolov@isem.irk.ru

##### **Музычук Светлана Юрьевна,**

кандидат экономических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия,  
e-mail: muz@isem.irk.ru

##### **Svetlana Yu. Muzychuk,**

Cand. Sci. (Economics),  
Leading Researcher,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
Siberian branch of the Russian Academy of Sciences,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
e-mail: muz@isem.irk.ru

##### **Музычук Роман Игоревич,**

ведущий инженер,  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева  
Сибирского отделения Российской академии наук,  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия,  
e-mail: rmuz@isem.irk.ru

##### **Roman I. Muzychuk,**

Leading Engineer,  
Melentiev Energy Systems Institute,  
Siberian branch of the Russian Academy of Sciences,  
130 Lermontov St., Irkutsk 664033, Russia,  
e-mail: rmuz@isem.irk.ru



## Влияние пористости на прочность огнеупорных изделий

© А.З. Исагулов, М.К. Ибатов, С.С. Квон, Т.В. Ковалёва, С.К. Аринова, А.М. Достоева

Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда, Республика Казахстан

**Резюме:** Важной актуальной задачей в производстве огнеупоров для металлургических целей на настоящий момент является повышение качества огнеупорных изделий и снижение удельного расхода этих изделий на единицу продукции посредством использования современных ресурсосберегающих процессов. Существенными показателями, влияющими на эксплуатационные свойства огнеупоров, являются прочность и пористость. В качестве объекта исследования были выбраны огнеупорные изделия, изготовленные с использованием в глинистой связке глин месторождения Белое Глинище (Карагандинская область). Использование сырья казахстанского происхождения способствует снижению стоимости продукции, также снижению импорта ввозимых товаров, а при условии получения огнеупорных материалов с более высокими механическими и эксплуатационными характеристиками дает перспективу экспорта продукции. Определена пористость огнеупорных изделий, изготовленных с использованием глин разных месторождений. Также определено влияние влажности шамотной смеси на прочность сжатия огнеупорных изделий. Определено, что наиболее целесообразным является следующий технологический режим изготовления огнеупорных изделий: прессование образцов из шихты – 12 с, базовое (начальное) давление – 22 МПа, которое через 7–8 с повышали до 27 МПа. Далее спекание проводится при температуре 1250–1270°C в течение 12 ч. Использование в композиции глинистой связки глины месторождения Белое Глинище позволяет добиться равномерной пористости и повышенной прочности изделия.

**Ключевые слова:** металлургические агрегаты, глина, огнеупор, пористость, пикнометрический метод, связка, прессование

**Благодарности:** Данные исследования проведены в рамках реализации гранта Комитета науки МОН РК АР05130230 «Разработка и внедрение технологии изготовления огнеупорных материалов для металлургической промышленности с оптимальной пористостью и повышенной термостойкостью».

**Информация о статье:** Дата поступления 6 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 13 марта 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Исагулов А.З., Ибатов М.К., Квон С.С., Ковалёва Т.В., Аринова С.К., Достоева А.М. Влияние пористости на прочность огнеупорных изделий. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(1):594-601. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-594-601

## Influence of porosity on refractory product strength

Aristotel Z. Isagulov, Marat K. Ibatov, Svetlana S. Kvon,  
Tatiana V. Kovaleva, Saniya K. Arinova, Ardak M. Dostaeva

Karaganda State Technical University, Karaganda, Republic of Kazakhstan

**Abstract:** Improving the quality of refractories and decreasing the specific consumption of these products per a production unit through using of modern resource-saving processes is a highly relevant task in manufacturing refractory materials for metallurgical purposes. Strength and porosity are important indicators affecting operational properties of refractory materials. The object of research is refractory products made of clay from Beloe Glinishche field (Karaganda region) in a clay bond. The use of raw materials of the Kazakhstan origin reduces the product costs, decreases the import of goods, and on the condition of receiving refractory materials with higher mechanical and operational characteristics, gives the prospect of product export. The porosity of refractory products made of clays from various fields is determined. The effect of chamotte mixture moisture content on the compressive strength of refractory products is identified. It is found out that the most expedient is the following technological mode of refractory product manufacturing: pressing of samples from furnace charge for 12 seconds, (initial) pressure is 22 MPa which in 7-8 seconds has been increased up to 27 MPa. Then sintering has been carried out at the temperature of 1250-1270 °C for 12 hours. The use of the clay from Beloe Glinishche field in the composition of a clay binder allows to achieve uniform porosity and higher strength of the product.

**Keywords:** metallurgical aggregates, clay, refractory, porosity, pycnometric method, binder, pressing

**Acknowledgements:** These studies have been carried out within the framework of the grant of the Committee of science

of MES of the Republic of Kazakhstan AP05130230 "Development and implementation of the production technology of refractory materials with optimal porosity and high heat resistance for the metallurgical industry."

**Information about the article:** Received February 6, 2019; accepted for publication March 13, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Isagulov A.Z., Ibatov M.K., Kvon S.S., Kovaleva T.V., Arinova S.K., Dostaeva A.M.. Influence of porosity on refractory product strength. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):594-601. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-594-601

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Огнеупоры определяют технический прогресс и развитие высокотемпературных технологий во многих отраслях промышленности. Metallургическая промышленность – основной потребитель огнеупоров, она расходует 60–75% всех огнеупорных материалов, причем 70–80% этого количества расходуется при выплавке стали. Экономическая эффективность огнеупоров определяется непрерывностью их службы [1–3].

В настоящее время в мире четко выявлена тенденция продления срока службы агрегатов металлургической промышленности, выполненных с использованием огнеупорных изделий. Огнеупорные изделия используют в виде кирпича для кладки доменных печей, порошков для наварки пода и откосов металлических ванн печей, для антипригарной покраски литейных форм, пробок для ковшей, как строительный материал, в физико-химических процессах, протекающих в металлургических агрегатах, а также в качестве флюсовых добавок [4, 5].

Важной актуальной задачей в производстве огнеупоров на настоящий момент является повышение их качества огнеупорных изделий и снижение удельного расхода этих изделий на единицу продукции посредством использования современных ресурсосберегающих процессов [6–9].

В результате использования беспористых огнеупоров нового поколения повышается безотходность производства, улучшаются условия труда, сокращаются энерго-, материало- и трудовые затраты. При этом увеличивается эффективность эксплуатации футеровок тепловых агрегатов с увеличением выпуска продукции.

Важными показателями, влияющими на эксплуатационные свойства огнеупоров, являются прочность и пористость. Надо от-

метить, что эти два свойства огнеупоров находятся в противоположности друг к другу.

С одной стороны, нулевая пористость будет способствовать повышению прочности и шлакоустойчивости изделия, с другой – нулевая пористость приводит к повышению плотности и массы огнеупорного изделия, дополнительному расходу сырья и усложняет процесс футеровки металлургических печей. С этой точки зрения наиболее выгодными в плане эксплуатации будут изделия, имеющие закрытую равномерно распределенную пористость [10, 11] при относительно небольшом среднем размере пор.

## 2. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ОГНЕУПОРОВ НА ПАРАМЕТРЫ ПОРИСТОЙ СТРУКТУРЫ ГОТОВОГО ИЗДЕЛИЯ

В исследованиях [12, 13] был определен оптимальный состав шамотной массы: шамот – 5,5 % фракции 0,1–0,3 мм; глинистая суспензия – 39,5%; влажность массы – 3–4%.

В данном исследовании в качестве глинистой суспензии использовались глины месторождений Белое Глинище, Федоровское и Дарат (Казахстан) (рис. 1). Использование сырья казахстанского происхождения способствует снижению стоимости продукции, а также снижению импорта ввозимых товаров, а при условии получения огнеупорных материалов с более высокими механическими и эксплуатационными характеристиками дает перспективу экспорта продукции.

Химический состав глин представлен в табл. 1. Исследования химического состава проводились с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра NITON XL2 – 100G. Содержание глинистой связки составляло 39% по массе, остальной состав



Рис. 1. Образцы для исследования на прочность, изготовленные с использованием глин различных месторождений: два образца слева изготовлены с глиной месторождения Белое Глинище  
Fig. 1. Strength test samples made of clays from various fields: two samples at the left are made of clay from Beloe Glinishche field

Таблица 1

Химический состав глин, использованных в исследованиях, %

Table 1

Chemical composition of clays used in researches, %

| Месторождение | Al+Si | Ti    | Fe    | Cu    | Zn    | Zr    | Pb    | Mn    |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Белое Глинище | 99,44 | 0,221 | 0,335 | –     | –     | –     | –     | –     |
| Дарат         | 98,05 | 1,08  | 0,803 | 0,014 | 0,019 | 0,034 | 0,005 | –     |
| Федоровское   | 96,91 | –     | 2,72  | –     | –     | 0,022 | –     | 0,078 |

огнеупорной массы соответствовал составу, приведенному выше и использованному в работах [7, 8].

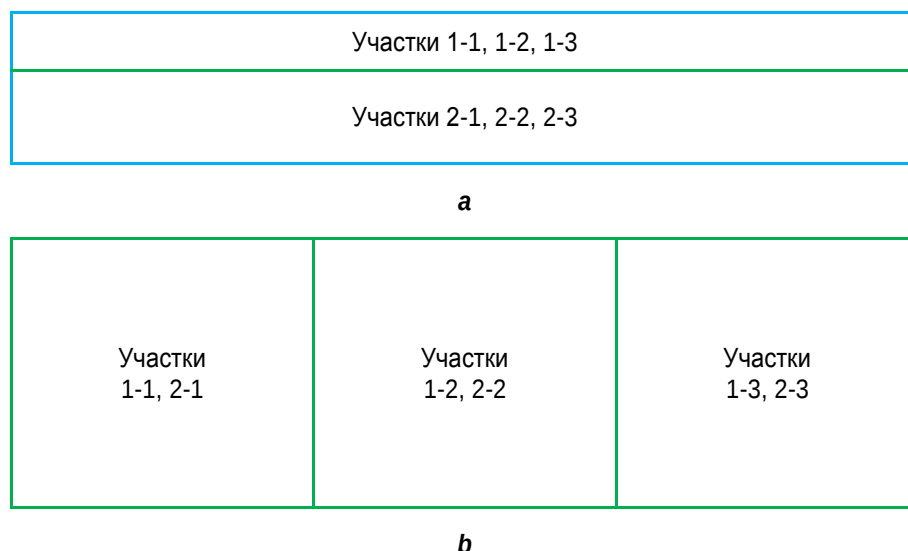
Технология изготовления изделий заключалась в следующем: прессование с использованием вариативного давления проводили в течение 12 с. Базовое (началь-

ное) давление составляло 22 МПа, затем через 7–8 с давление повышалось до 27 МПа. Спекание проводили при температуре 1270°C в течение 12 ч.

После прессования готовые образцы на отрезном станке (рис. 2) разделялись на шесть частей (схема приведена на рис. 3).



Рис. 2. Разделение образца на части на отрезном станке  
Fig. 2. Dividing a sample into parts on the sawing machine



**Рис. 3. Схема разделения образца на части: а – вид спереди (участки 1-1-3; 2-1-3), б – вид сверху; оранжевый контур – контуры кирпича, синяя линия – линия разрезания**

**Fig. 3. Diagram of sample dividing into parts: а – front view (sections 1-1-3; 2-1-3), б – top view; orange contour – brick contours, blue line – cut line**

Затем образцы из различных участков были исследованы на пористость с использованием двух методов:

- пикнометрический;
- ртутная порометрия.

Пикнометрический метод позволяет определять суммарную пористость (открытая, закрытая). Ртутная порометрия дает более широкий спектр информации: объем открытой пористости, средний размер пор,

распределение пор по размерам, дифференциальное распределение объема пор и др.

Пикнометрический метод проводился согласно ГОСТ 2211-65<sup>1</sup>. Метод ртутной порометрии использовался с использованием системы PASCAL400 согласно технической инструкции. Результаты исследования представлены в табл. 2.

**Таблица 2**

**Пористость различных участков образцов с использованием глин разных месторождений**

**Table 2**

**Porosity of various parts of samples made of clays from various fields**

| Участок изделия | Суммарная пористость, % |       |             | Открытая пористость, % |       |             |
|-----------------|-------------------------|-------|-------------|------------------------|-------|-------------|
|                 | Белое Глинище           | Дарат | Федоровское | Белое Глинище          | Дарат | Федоровское |
| 1-1             | 10,6                    | 12,7  | 12,5        | 3,2                    | 6,8   | 6,9         |
| 1-2             | 11,2                    | 11,3  | 14,3        | 3,1                    | 6,9   | 7,0         |
| 1-3             | 9,7                     | 14,2  | 15,6        | 3,4                    | 7,2   | 6,8         |
| 2-1             | 10,5                    | 16,0  | 13,1        | 3,4                    | 6,8   | 8,1         |
| 2-2             | 10,4                    | 14,5  | 14,1        | 3,6                    | 7,4   | 6,2         |
| 2-3             | 9,9                     | 12,9  | 12,8        | 3,3                    | 6,9   | 7,1         |

<sup>1</sup>ГОСТ 2211-65 (ИСО 5018-83). Огнеупоры и огнеупорное сырье. Методы определения плотности. Введ. 01.07.1966. М.: Изд-во стандартов, 2004. / GOST 2211-65 (ISO 5018-83). Refractories and refractory raw materials. Methods of density determination. Introduced 1 July 1966. M.: Publishing house of standards, 2004.



Из табл. 2 видно, что наименьшей пористостью обладают образцы с использованием глины месторождения Белое Глинище, причем это касается как суммарной, так и открытой пористости. Другим важным отличием является доля открытой пористости в величине общей пористости. Доля открытой пористости наименьшая также у образцов, изготовленных с использованием глин месторождения Белое Глинище. Меньшая открытая пористость для этих образцов характерна как в абсолютных значениях 3,2% против 6,8%, так и в относительных. Доля открытой пористости для данных образцов составляет около 30% в суммарной пористости, в то время как для других образцов доля открытой пористости составляет около 50%.

Сравнение данных пористости по участкам также показывает, что характер распределения пор по участкам изделия неравномерный. Расхождение между минимальным и максимальным значением пористости по участкам для образцов с глиной месторождения 1 составляет 14%. Для других образцов эта величина равна 20%.

Градиент в распределении пористости, разные величины суммарной пористости и открытой обуславливают разную механическую прочность изделия. В связи с этим была исследована прочность изделий после обжига. Испытания проводили на машине Instron-100 согласно ГОСТ 25.503-97<sup>2</sup>. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Как видно из данных табл. 3, наилучшими механическими свойствами обладает образец с использованием глины месторождения 1.

В данном исследовании не изменяли режимы прессования и обжига, а менялся только состав глинистой связки.

Очевидно, что именно состав глинистой связки влияет на характер пористости, что приводит к изменению параметров пористой структуры и механических свойств огнеупора.

Объяснение этого факта, очевидно, можно связать с составом глин разных месторождений. Глины месторождения Белое Глинище в отличие от других содержат меньшее количество каолина  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Часть каолина в глинах этого месторождения представлена схожим по химическому составу минералом галлуазитом  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$  или  $\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}][\text{OH}]_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ . В частности, этим объясняется более светлый цвет глины. Состав и строение галлуазита отличаются от состава и строения каолина: в его составе гидратной влаги на 2 молекулы больше, они располагаются между слоями алюмосиликатных цепочек. Подобный состав и строение определяют поведение глины при нагреве: прослойка воды между слоями имеет слабую связь, легко удаляется, образуя равномерно распределенную пористость по всей структуре.

Таблица 3

**Испытания на прочность образцов с использованием  
глин различных месторождений**

Table 3

**Strength tests of samples made of clays of various fields**

| Глина в связке              | Прочность на сжатие, МПа | Прочность на изгиб, МПа |
|-----------------------------|--------------------------|-------------------------|
| Месторождение Белое Глинище | 22,5                     | 5,9                     |
| Месторождение Дарат         | 20,9                     | 5,1                     |
| Месторождение Федоровское   | 21,4                     | 5,3                     |

<sup>2</sup>ГОСТ 25.503-97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. Введ. 01.07.1999. М.: Стандартинформ, 2005. / GOST 25.503-97. Calculations and strength tests. Methods of mechanical testing of metals. Compression test method. Introduced 1 July 1999. Moscow: Standardinform Publ., 2005.

Проведенные исследования показали возможность использования глины месторождения Белое глинище в качестве глинистой связки при производстве огнеупоров. Использование данной глины в количестве 39% по массе фракции 150 мкм позволяет получать огнеупорные шамотные изделия

достаточно высокой прочности с пористостью 10–12%, причем большая часть пор приходится на долю закрытой пористости, что позволяет предположить более высокое сопротивление затеканию шлака и металлического расплава в изделие, т.е. увеличить срок службы огнеупора.

### **Библиографический список**

1. Сойфер В.М. О стандарте на огнеупорные изделия для футеровки сталеразливочных ковшей (ГОСТ Р 53933-2010) // Огнеупоры и техническая керамика. 2012. № 10. С. 44–45.
2. Лутц Р. Двухслойные огнеупорные изделия, получаемые автоматическим прессованием двух различных материалов за один рабочий цикл // Огнеупоры и техническая керамика. 2007. № 3. С. 33–36.
3. Kovářík O., Materna A., Siegl J., Čížek J., Klečka J. Fatigue crack growth in plasma-sprayed refractory materials // Journal of Thermal Spray Technology. 2019. Vol. 28 (1-2). P. 87–97.
4. Vargas R., Neggers J., Canto R.B. Comparison of two full-field identification methods for the wedge splitting test on a refractory // Journal of the european ceramic society. 2018. Vol. 16. No. 38. P. 5569–5579.
5. Пастухов А.Г., Минасян А.Г., Шарая О.А. Оценка напряженно-деформированного состояния сегмента прессовального измельчителя // Технология машиностроения. 2016. № 3. С. 43–46.
6. Kovalev P.V., Ryaboshuk S.V., Issagulov A.Z., Kulikov V.Y., Kvon S.S., Chsherbakova Y.P., Sultamurat G.I., Jironkin M.V. Improving production technology of tube steel grades in converter process // Metalurgija (Zagreb, Croatia). 2016. Vol. 55. No. 4. P. 715–718.
7. Коробейников В.В., Ткаченко С.С. Энергосберегающие нагревательные агрегаты нового поколения // Литье и металлургия. 2017. № 3 (88). С. 34–38.
8. Юсупходжаев А.А., Мирзажоннова С.Б., Саидходжаева Ш., Маткаримов С.Т., Нодилов В. Физико-химические процессы на границе раздела расплав – огнеупор в металлургических плавильных печах // International Scientific and Practical Conference World science. 2016. Т. 1. № 11 (15). С. 38–40.
9. Избембетов Д.Д., Амангельдиев Н.М., Зупаров Н.С. Разработка технологии производства огнеупорных изделий из рукавной пыли и шлаков высокоуглеродистого феррохрома // Теория и технология металлургического производства. 2015. № 2 (17). С. 56–60.
10. Куликов В.Ю., Квон С.С., Ковалева Т.В., Еремин Е.Н. Исследования влияния режимов прессования на параметры пористой структуры формы // Литейщик России. 2018. № 8. С. 9–14.
11. Кремер Р., Лутц Р. Повышение качества фасонных огнеупорных изделий за счет современной технологии прессования // Огнеупоры и техническая керамика. 2007. № 4. С. 31–35.
12. Исагулов А.З., Куликов В.Ю., Квон С.С., Щербак Е.П., Достаева А.М. Влияние технологических параметров на изготовление шамотных кирпичей с высокой термостойкостью и прочностью // Литейщик России. 2018. № 4. С. 36–41.
13. Исагулов А.З., Ибатов М.К., Куликов В.Ю., Квон С.С., Аринова С.К. Влияние пористости шамотных кирпичей на их механические и эксплуатационные свойства // Металлургия машиностроения. 2018. № 3. С. 13–15.

### **References**

1. Sojfer V.M. About GOST P53933-2010 for refractory bricks. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics], 2012, no. 10, pp. 44–45. (In Russ.).
2. Lutc R. Double-layered refractory product, automatically pressed from two different materials in one single working cycle. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics], 2007, no. 3, pp. 33–36. (In Russ.).
3. Kovářík O., Materna A., Siegl J., Čížek J., Klečka J. Fatigue crack growth in plasma-sprayed refractory materials. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2019, vol. 28 (1-2), pp. 87–97.
4. Vargas R., Neggers J., Canto R.B. Comparison of two full-field identification methods for the wedge splitting test on a refractory. *Journal of the european ceramic society*, 2018, vol. 16, no. 38, pp. 5569–5579.
5. Pastuhov A.G., Minasyan A.G., Sharaya O.A. Evaluation of the stress-strain state of the press-rolling mill segment. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2016, no. 3, pp. 43–46. (In Russ.).
6. Kovalev P.V., Ryaboshuk S.V., Issagulov A.Z., Kulikov V.Y., Kvon S.S., Chsherbakova Y.P., Sultamurat G.I., Jironkin M.V. Improving production technology of tube steel grades in converter process. *Metalurgija* (Zagreb, Croatia), 2016, vol. 55, no. 4, pp. 715–718.
7. Korobejnikov V.V., Tkachenko S.S. Energy-saving heating units of new generation. *Lite i metallurgiya* [Foundry Production and Metallurgy], 2017, no. 3 (88), pp. 34–38. (In Russ.).
8. Yusuphodzhaev A.A., Mirzazhonova S.B., Saidhodzhaeva Sh., Matkarimov S.T., Nodirov V. Physico-chemical processes at the melt – refractory interface in metallurgical smelting furnaces. *International Scientific*



and Practical Conference World science, 2016, vol. 1, no. 11 (15), pp. 38–40. (In Russ.).

9. Izbembetov D.D., Amangel'diev N.M., Zuparov N.S. Development of technology for production of refractory products from the hose fume and high-carbon ferrochrome slags. *Teoriya i tekhnologiya metallurgicheskogo proizvodstva* [Theory and Technology of Metallurgical Production], 2015, no. 2 (17), pp. 56–60. (In Russ.).

10. Kulikov V.Yu., Kvon S.S., Kovaleva T.V., Eremin E.N. Researches of influence of pressure regimes on parameters of the porous structure of the form. *Litejshchik Rossii*, 2018, no. 8, pp. 9–14. (In Russ.).

11. Kremer R., Lutc R. Quality Improvement of Shaped Refractories by Modern Pressing Technology. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika* [Refractories and Technical Ceramics], 2007, no. 4, pp. 31–35. (In Russ.).

12. Isagulov A.Z., Kulikov V.Yu., Kvon S.S., Shcherbakova E.P., Dostaeva A.M. Influence of technological parameters on the production of chamotte bricks with high thermal stability and strength. *Litejshchik Rossii*, 2018, no. 4, pp. 36–41. (In Russ.).

13. Isagulov A.Z., Ibatov M.K., Kulikov V.Yu., Kvon S.S., Arinova S.K. The effect of fireclay brick porosity on their mechanical and operational properties. *Metallurgiya mashinostroeniya*, 2018, no. 3, pp. 13–15. (In Russ.).

#### Критерии авторства

Исагулов А.З., Ибатов М.К., Квон С.С., Ковалёва Т.В., Аринова С.К., Достаева А.М. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Isagulov A.Z., Ibatov M.K., Kvon S.S., Kovaleva T.V., Arinova S.K., Dostaeva A.M. have equal authors rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

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

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Исагулов Аристотель Зейнуллинович,**  
доктор технических наук, профессор,  
первый проректор,  
Карагандинский государственный  
технический университет,  
100012, г. Караганда, б-р Мира, 56,  
Республика Казахстан,  
e-mail: a.isagulov@kstu.kz

**Ибатов Марат Кенесович,**  
доктор технических наук, профессор,  
ректор,  
Карагандинский государственный  
технический университет,  
100012, г. Караганда, б-р Мира, 56,  
Республика Казахстан,  
e-mail: anjijite@mail.ru

**Квон Светлана Сергеевна,**  
кандидат технических наук,  
доцент, профессор кафедры нанотехнологии  
и металлургии,  
Карагандинский государственный  
технический университет,  
100012, г. Караганда, б-р Мира, 56,  
Республика Казахстан,  
e-mail: svetlana.1311@mail.ru

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Aristotel Z. Isagulov,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
First Vice-Rector,  
Karaganda State Technical University,  
56 Mira Blvd, Karaganda 100012,  
Republic of Kazakhstan,  
e-mail: a.isagulov@kstu.kz

**Marat K. Ibatov,**  
Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Rector,  
Karaganda State Technical University,  
56 Mira Blvd, Karaganda 100012,  
Republic of Kazakhstan,  
e-mail: anjijite@mail.ru

**Svetlana S. Kvon,**  
Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor, Professor of the Department of  
Nanotechnology and Metallurgy,  
Karaganda State Technical University,  
56 Mira Blvd, Karaganda 100012,  
Republic of Kazakhstan,  
e-mail: svetlana.1311@mail.ru

**Ковалёва Татьяна Викторовна,**  
магистр,  
докторант кафедры нанотехнологии  
и металлургии,  
Карагандинский государственный технический университет,  
100012, г. Караганда, б-р Мира, 56,  
Республика Казахстан,  
e-mail: sagilit@mail.ru

**Аринова Сания Каскатаевна,**  
магистр,  
докторант кафедры нанотехнологии и металлургии,  
Карагандинский государственный  
технический университет,  
100012, г. Караганда, б-р Мира, 56,  
Республика Казахстан,  
e-mail: sanya\_kazah@mail.ru

**Достаева Ардак Мухамедиевна,**  
доктор,  
старший преподаватель кафедры нанотехнологии и  
металлургии,  
Карагандинский государственный технический университет,  
100012, г. Караганда, б-р Мира, 56,  
Республика Казахстан,  
e-mail: ardak\_erkekyz@mail.ru

**Tatiana V. Kovaleva,**  
Holder of Master's degree,  
Doctoral student of the Department  
of Nanotechnology and Metallurgy,  
Karaganda State Technical University,  
56 Mira Blvd, Karaganda 100012,  
Republic of Kazakhstan,  
e-mail: sagilit@mail.ru

**Saniya K. Arinova,**  
Holder of Master's degree,  
Doctoral student of the Department  
of Nanotechnology and Metallurgy,  
Karaganda State Technical University,  
56 Mira Blvd, Karaganda 100012,  
Republic of Kazakhstan,  
e-mail: sanya\_kazah@mail.ru

**Ardak M. Dostaeva,**  
PhD,  
Senior Lecturer of the Department  
of Nanotechnology and Metallurgy,  
Karaganda State Technical University,  
56 Mira Blvd, Karaganda 100012,  
Republic of Kazakhstan,  
e-mail: ardak\_erkekyz@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 620.193

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-602-616>

## Повышение коррозионной стойкости сварных радиантных и конвекционных змеевиков в трубчатых печах на нефтеперерабатывающем заводе «Кинеш»

© Б. Исса, В.Ю. Бажин, Н.М. Теляков, А.Н. Теляков

Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме:** Повышение коррозионной стойкости нагревательных трубчатых печей с применением специального ингибитора коррозии марки СНПХ – 6030 «Б» является экономичным способом и играет важную роль для нефтяной промышленности, поскольку полная замена змеевиков трубчатых печей из-за коррозии будет дорогостоящим процессом. Наличие тяжелых металлов, металлических соединений и других примесей в сырой нефти отрицательно влияет на коррозионную стойкость оборудования и установок нефтеперерабатывающих заводов. В работе использованы современные методы: химический анализ и атомно-абсорбционная спектроскопия (на приборе VARIAN-SPECTRA AA 220 FS), они проводились с помощью аналитического сканирующего (растрового) электронного микроскопа VEGA3 TESCAN. Микрорентгеноспектральный анализ состава фаз, присутствующих в материалах змеевика, проводился методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на спектрометре Oxford INCA Energy EDS. Анализ коррозионной стойкости змеевика выполнен методом весовых потерь. Проведенные исследования показали, что образуется точечная коррозия, которую можно отнести к электрохимическому типу. Предлагаемый ингибитор является эффективным для увеличения коррозионной стойкости материала змеевиков трубчатых печей за счет снижения скорости коррозии. Наилучшие результаты были достигнуты с использованием выбранного ингибитора при следующих условиях: продолжительность – 48 ч, концентрация ингибитора – 0,02% масс., температура – 100 °C; эффективность снижения скорости коррозии при данных условиях достигла 97,94%.

**Ключевые слова:** нефтеперерабатывающий завод, змеевик, нагревательная трубчатая печь, коррозия, ингибитор, сырая нефть

**Информация о статье:** Дата поступления 13 мая 2019 г.; дата принятия к печати 31 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Исса Б., Бажин В.Ю., Теляков Н.М., Теляков А.Н. Повышение коррозионной стойкости сварных радиантных и конвекционных змеевиков в трубчатых печах на нефтеперерабатывающем заводе «Кинеш». *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):602–616. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-602-616

## Improving corrosion resistance of welded radiant and convection coiled-pipes in pipe stills at «Kinef» oil refinery

Bashar Issa, Vladimir Yu. Bazhin, Nail M. Telyakov, Aleksey N. Telyakov

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract:** Improving corrosion resistance of heating pipe stills with the use of a special corrosion inhibitor SNPH – 6030 “B” is an economical method and is very important for the oil industry, since complete replacement of damaged by corrosion pipe still coils is a very costly process. The presence of heavy metals, metal compounds and other impurities in crude oil adversely affects the corrosion resistance of oil refinery equipment and installations. Modern methods used in the study including chemical analysis and atomic absorption spectroscopy (using VARIAN-SPECTRA AA 220 FS device) were carried out with the application of an analytical scanning (raster) electron microscope VEGA3 TESCAN. Micro X-ray spectral analysis of the composition of phases present in coiled-pipe materials was carried out by the method of energy dispersive x-ray spectroscopy on Oxford INCA Energy EDS spectrometer. The method of weight loss was used to analyze the corrosion ability of the coil. The conducted studies have shown the formation of pitting corrosion that can be attributed to the electrochemical type. The proposed inhibitor is effective in terms of increasing the corrosion resistance of pipe still coil material due to corrosion rate reduction. The best results were achieved using the selected inhibitor under the following conditions: duration – 48 h, inhibitor concentration – 0,02 wt.%, temperature – 100 °C; effectiveness of corrosion rate reduction under these conditions reached 97,94%.

**Keywords:** oil refinery, coiled-pipe, heating pipe still, corrosion, inhibitor, crude oil

**Information about the article:** Received May 13, 2019; accepted for publication May 31, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Issa B., Bazhin V.Yu., Telyakov N.M., Telyakov A.N. Improving corrosion resistance of welded radiant and convection coiled-pipes in pipe stills at Kinef oil refinery. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):602–616. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-602-616

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена изучению состояния стальных сварных радиантных и конвективных змеевиков при их эксплуатации в трубчатых печах нефтеперерабатывающей, нефтехимической, химической, газовой отраслей промышленности, работающих при температуре стенки змеевика до 760°C и давлении до 16 МПа.

Одной из главных проблем, с которыми сталкиваются на нефтеперерабатывающих заводах (НПЗ) в процессе переработки сырой нефти, является коррозия на металлосодержащих элементах нагревательных трубчатых печей первичного разделения сырой нефти<sup>1</sup> [1, 2], что может, в свою очередь, привести к катастрофическим последствиям – взрывам и пожарам на предприятиях. Коррозионные разрушения элементов оборудования промышленных предприятий возникают из-за нахождения металлосодержащих конструкций во влажных условиях, под воздействием высоких температур, в атмосфере вредных газообразных веществ [3–7]. Эксплуатация основного оборудования нефтеперерабатывающих предприятий при колоссальном перегреве значительно усугубляет процессы повреждения и разрушения металлических конструкций, в том числе змеевиков трубчатых печей [8].

В статье подробно рассматриваются проблемы коррозии змеевиков нагревательных трубчатых печей. На основании полученных результатов и масштабных испытаний сделаны важные выводы, которые могут привести к заметному повышению степени их защиты на НПЗ.

## 2. ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Целью работы является повышение коррозионной стойкости змеевиков нагревательных трубчатых печей на НПЗ «КИНЕФ» («Киришинефтеоргсинтез») в г. Кириши (Ленинградская обл.) для снижения пожарной аварийности в трубчатых печах, повышения их производительности, уменьшения экономических потерь и предотвращения возможных экологических катастроф, а также создания высокого уровня безопасности при их эксплуатации.

## 3. ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Изучение химического состава и микроструктуры змеевика трубчатой печи НПЗ «КИНЕФ».

2. Выявление химического состава проб Западно-Сибирской сырой нефти и наличия в ее остатках и шламах тяжелых металлов, металлосодержащих соединений и других вредных элементов, влияющих на повреждение и разрушение змеевика, выполненного из стального сплава, в результате коррозии.

3. Решение проблемы повышения коррозионной стойкости змеевиков трубчатых печей с применением ингибитора коррозии марки СНПХ – 6030 «Б» для снижения скорости коррозии змеевиков трубчатых печей в процессах предварительного нагрева сырой нефти.

4. Изучение технологических особенностей представленного выше действия с целью повышения производительности и эффективности работы трубчатых печей.

<sup>1</sup>Руководящий технический материал 26-02-39-84. Методы защиты от коррозии и выбор материалов для основного оборудования и трубопроводов установок подготовки и первичной переработки нефти (электрообессоливающих установок, АВТ, АТ, ЭЛОУ-АВТ). М.: ВНИИ Нефтемаш, 1984. 47 с. / Guiding technical material 26-02-39-84. Methods of corrosion protection and selection of materials for the main equipment and pipelines of installation for oil preparing and primary processing (ELOU, AVT, AT, ELOU-AVT). Moscow: Vniineftemash Publ., 1984. 47 p.



#### 4. МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении исследований применялись различные аналитические методы. Химический анализ и определение содержания металлов и металлосодержащих соединений в пробах Западно-Сибирской сырой нефти делали с помощью атомно-абсорбционной спектроскопии на приборе VARIAN-SPECTRA AA 220 FS (Нидерланды). Химический, микроструктурный анализ и факт наличия металлов в образцах змеевиков трубчатых печей наблюдали под сканирующим (растровым) электронным микроскопом марки VEGA3 TESCAN (Чехия). Микрорентгеноспектральный анализ состава фазовых соединений, присутствующих в сплавах змеевика, проводили методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на приборе марки Oxford INCA Energy EDS (Великобритания). Анализ коррозионной стойкости змеевика выполняли методом весовых потерь (при проведении коррозионных измерений).

#### 5. ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ТРУБЧАТЫХ ПЕЧЕЙ НА НЕФТЕПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Объектом исследования явились нагревательные трубчатые печи на нефтеперерабатывающих предприятиях с целью снижения скорости коррозии элементов их конструкций, приводящей к авариям. Для этого изучались вышедшие из строя элементы оборудования – змеевики трубчатых печей НПЗ «КИНЕФ».

Сварные радиантные и конвекционные змеевики трубчатых печей изготовлены согласно РД 3688-00220302-003-04 (требованиям к проектированию, изготовлению и эксплуатации нагревательных трубчатых печей).

Материалом сварных радиантных и конвекционных змеевиков трубчатых печей является сталь мартенситного класса (15Х5М), относящаяся к стали жаропрочной низколегированной (с рекомендуемой температурой применения до 650°C). Химический состав данной стали показан в табл. 1, технические и эксплуатационные показатели змеевика – в табл. 2.

Марки стали для сварных радиантных и конвекционных змеевиков трубчатых печей должны применяться в соответствии с ГОСТ (табл. 3).

В наших исследованиях были изучены элементы змеевиков трубчатых печей НПЗ «КИНЕФ», отобранных после воздействия аварии (причина аварии: прогар стенки змеевика). На данное предприятие сырье доставляется по трубопроводу из центров распределения в Ярославской области (комбинат перерабатывает Западно-Сибирскую и Волго-Уральскую виды нефти).

Исследования проведены на участке трубчатой печи установки ЭЛОУ-АВТ-6 (электрообессоливающая установка атмосферно-вакуумной трубчатки), которая состоит из двух вакуумных колонн. На рис. 1 показана схема данной установки.

Для исследования причин повреждения и разрушения змеевика в трубчатых печах были отобраны фрагменты змеевика на различных участках печи для анализа химического состава материала и определения количественного перехода основных элементов в результате коррозии.

Таблица 1

**Химический состав стали 15Х5М, % масс.**

Table 1

**Chemical composition of steel 15X5M, % wt.**

| Наименование элементов |        |        |        |          |         |       |        |        |         |         |        | Прочие         |
|------------------------|--------|--------|--------|----------|---------|-------|--------|--------|---------|---------|--------|----------------|
| C                      | Si     | Mn     | Ni     | S        | P       | Cr    | Mo     | W      | V       | Ti      | Cu     |                |
| до 0,15                | до 0,5 | до 0,5 | до 0,6 | до 0,025 | до 0,03 | 4,5–6 | 0,45–6 | до 0,3 | до 0,05 | до 0,03 | до 0,2 | Fe – остальное |

Таблица 2

Технические и эксплуатационные показатели змеевика

Table 2

Technical and operational indicators of the coiled-pipe

| Параметр                            | Величина параметра |
|-------------------------------------|--------------------|
| Рабочая температура стенки змеевика | До 760°C           |
| Рабочее давление                    | До 16 МПа          |
| Наружный диаметр змеевика           | 57–426 мм          |
| Длина змеевика                      | до 26 м            |
| Поверхность печи                    | Расчетная площадь  |
| Теплоустойчивая толщина             | 4–40 мм            |

Таблица 3

Марки стали сварных радиантных и конвекционных змеевиков

Table 3

Steel grades of welded radiant and convection coiled-pipes

| Сталь марки змеевика | ГОСТ     |
|----------------------|----------|
| 20                   | 1050-88  |
| 15X5M                | 20072-74 |
| 12x18n10t            | 5632-72  |
| 08x18n10t            | 5632-72  |
| 10x17n13m2t          | 5632-72  |
| 20x23n18             | 5632-72  |

## 6. ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СОСТАВА СПЛАВА ЗМЕЕВИКА

Структуру образца, отобранного с участков змеевика, можно определить под растровым электронным микроскопом в спектрах, как показано на рис. 2. Химический состав спектров показан в табл. 4.

Для изучения коррозии в змеевиках трубчатой печи, используемой для подогрева нефти, было необходимо проанализировать химический состав материала змеевиков на счет наличия в них металлов, металлических соединений, кислорода, хлоридов, серы и других составляющих, которые присутствуют в нефти и могут играть значительную роль в процессе коррозии.

Для проведения исследований было подготовлено несколько образцов змеевика с целью сравнения их микроструктуры, коррозионных показателей и зоны термического влияния во время горения.

Для чистых (некорродированных) участков, т.е. без каких-либо признаков коррозии, на рис. 2 представлены спектры в качестве примера, а в табл. 4 приведены их

химические составы.

Для поврежденных (корродированных) участков на рис. 3–5 представлены спектры 14, 22 и 9 в качестве примера, а в табл. 5–7 – их химические составы.

Следует отметить, что в спектре 14 фиксируется значительное содержание кислорода (выше 39%), хлора (выше 8%), которые играют значительную роль в процессе коррозии.

В спектре 22 также фиксируется высокое содержание кислорода (до 34%), меди (свыше 22%) и хлора (до 4,5%), которые активно участвуют в процессе коррозии.

Следует отметить, что в спектре 9 зафиксировано высокое содержание кислорода (до 22%), а также алюминия (до 7%), хлора (до 1,7%), которые оказывают решающее влияние в процессе коррозии и высокотемпературных реакциях.

Как можно увидеть на рис. 3–5, в правой части – это материал змеевика, а левая часть – это окалина, образовавшаяся в результате длительного нахождения змеевика под горелками трубчатой печи. И между ними существует переходная зона коррозии.

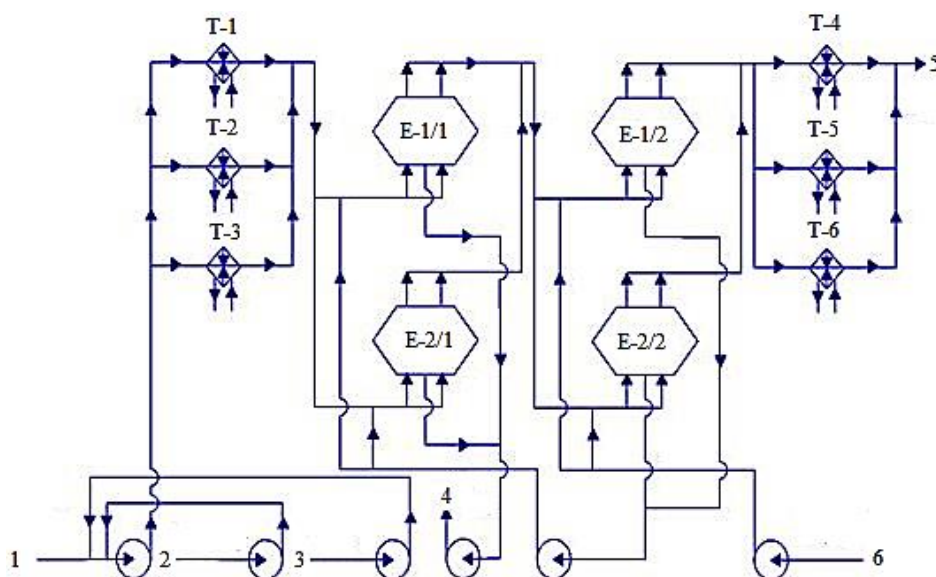


Рис. 1. Схема установки ЭЛОУ-АВТ-6: 1 – сырая нефть; 2 – деэмульсатор; 3 – щелочь; 4 – вода на очистку; 5 – обезвоженная и обессоленная нефть на АТ и АВТ; 6 – вода химически очищенная, T-1, T-2, T-3, T-4, T-5, T-6 – теплообменник, E-1/1, E-2/1 – электродегидратор первой степени, E-1/2, E-2/2 – электродегидратор второй степени

Fig. 1. Diagram of the installation ELOU-AVT-6: 1 – crude oil; 2 – demulsifying agent; 3 – alkali; 4 – water for cleaning; 5 – dehydrated and desalted oil at atmospheric pipe still and atmospheric vacuum pipe still; 6 – chemically purified water, T-1, T-2, T-3, T-4, T-5, T-6 – heat exchanger, E-1/1, E-2/1 – electrical dehydrator of the first degree, E-1/2, E-2/2 – electrical dehydrator of the second degree

Проект 1

21.01.2018 17:43:49

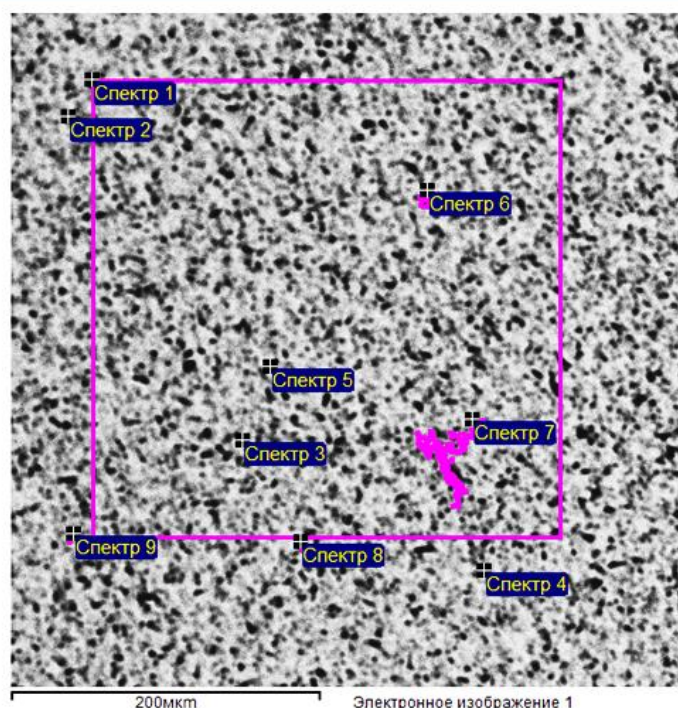


Рис. 2. Электронный снимок – расположение 9 спектров змеевика в неповрежденных участках змеевика, масштаб 1:200

Fig. 2. Electronic micrograph – location of 9 spectra of the coiled-pipe in the unaffected areas of the coiled-pipe, scale 1:200

Таблица 4

Аналитический состав 9 спектров составляющих змеевика

Table 4

Analytical composition of 9 spectra of coiled-pipe components

| № спектра | Содержание, % масс. |       |      |      |       | Итого |
|-----------|---------------------|-------|------|------|-------|-------|
|           | O                   | Si    | Cl   | Cr   | Fe    |       |
| 1         | –                   | 10,20 | –    | 5,47 | 84,33 | 100   |
| 2         | –                   | 37,90 | 0,62 | 3,84 | 57,63 | 100   |
| 3         | –                   | 6,42  | –    | 4,56 | 89,02 | 100   |
| 4         | –                   | 22,20 | –    | 4,17 | 73,63 | 100   |
| 5         | –                   | 2,87  | –    | 4,68 | 92,45 | 100   |
| 6         | –                   | 12,74 | –    | 5,41 | 81,85 | 100   |
| 7         | –                   | 4,24  | –    | 5,34 | 90,41 | 100   |
| 8         | 9,98                | 19,64 | –    | 4,27 | 66,12 | 100   |
| 9         | –                   | 4,04  | –    | 7,55 | 88,41 | 100   |

Проект 1

21.01.2018 18:05:58

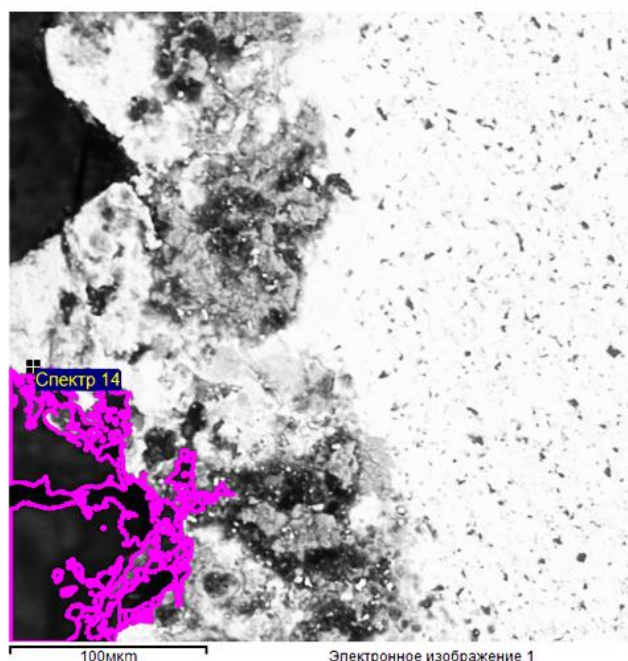


Рис. 3. Электронный снимок – спектр 14 в поврежденном участке змеевика, масштаб 1:100

Fig. 3. Electronic micrograph – spectrum 14 in the affected area of the coiled-pipe, scale 1:100

При сравнении содержания хлора (соответственно, хлоридов металлов) в спектрах поврежденных (корродированных) участков с содержанием хлора в чистых (некорродированных) областях можно заметить, что содержание хлоридов в спектрах 14, 22, 9 (подверженные области коррозии) относительно к 0,62% (содержанию хлоридов) в спектре 2 (чистая неподверженная

коррозией область) увеличивается в  $8,01/0,62 = 13$  раз,  $4,44/0,62 = 7$  раз,  $1,69/0,62 = 3$  раза, соответственно.

Анализируя данные рис. 3–5, можно сделать вывод, что в змеевиках трубчатой печи существует много участков, свидетельствующих о возникновении коррозии. На рис. 6 представлены различные виды коррозии в переходной зоне.



Таблица 5

Аналитический состав спектра 14 змеевика

Table 5

Analytical composition of the coiled-pipe spectrum 14

| Элемент | % масс.     | % ат. |
|---------|-------------|-------|
| O       | 39,38       | 66,42 |
| Al      | 0,66        | 0,66  |
| Si      | 1,91        | 1,83  |
| S       | 0,99        | 0,83  |
| Cl      | <b>8,01</b> | 6,1   |
| Cr      | 14,88       | 7,72  |
| Fe      | 32,89       | 15,89 |
| Cu      | 1,28        | 0,54  |
| Итого   | 100,00      | –     |

Таблица 6

Аналитический состав спектра 22 змеевика

Table 6

Analytical composition of the coiled-pipe spectrum 22

| Элемент | % масс.     | % ат. |
|---------|-------------|-------|
| O       | 33,74       | 60,45 |
| Al      | 2,71        | 2,88  |
| Si      | 5,47        | 5,58  |
| S       | 1,67        | 1,49  |
| Cl      | <b>4,44</b> | 3,59  |
| K       | 1,04        | 0,76  |
| Ca      | 2,46        | 1,76  |
| Cr      | 3,24        | 1,79  |
| Fe      | 21,14       | 10,85 |
| Cu      | 22,35       | 10,08 |
| Zn      | 1,75        | 0,77  |
| Итого   | 100,00      |       |

Таблица 7

Аналитический состав спектра 9 змеевика

Table 7

Analytical composition of the coiled-pipe spectrum 9

| Элемент | % масс. | % ат. |
|---------|---------|-------|
| O       | 22,02   | 43,58 |
| Al      | 6,85    | 8,84  |
| Si      | 2,03    | 2,51  |
| S       | 0,85    | 0,92  |
| Cl      | 1,69    | 1,66  |
| Cr      | 5,55    | 3,72  |
| Fe      | 56,41   | 35,17 |
| Cu      | 5,03    | 2,76  |
| Zn      | 1,57    | 0,84  |
| Итого   | 100,00  |       |

Проект 1

21.01.2018 18:08:32

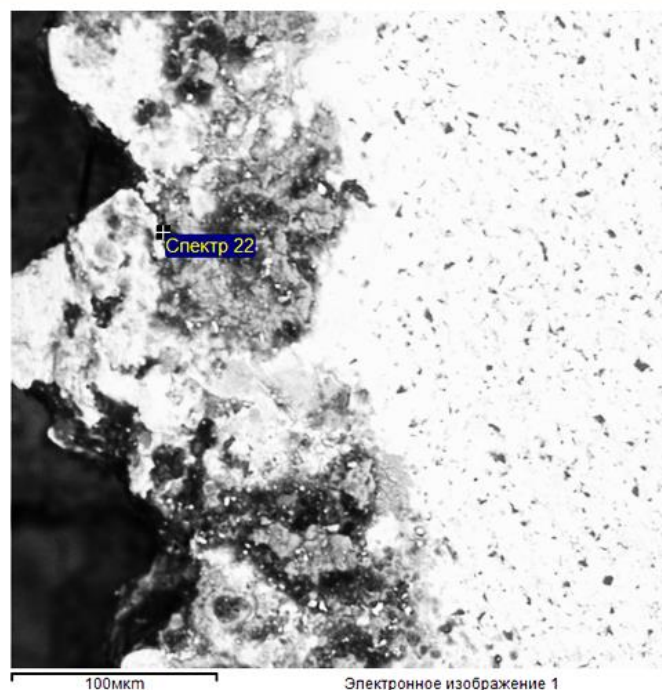


Рис. 4. Электронный снимок – спектр 22 в поврежденном участке змеевика, масштаб 1:100  
Fig. 4. Electronic micrograph – spectrum 22 in the affected area of the coiled-pipe, scale 1: 100

Проект 1

21.01.2018 18:04:27

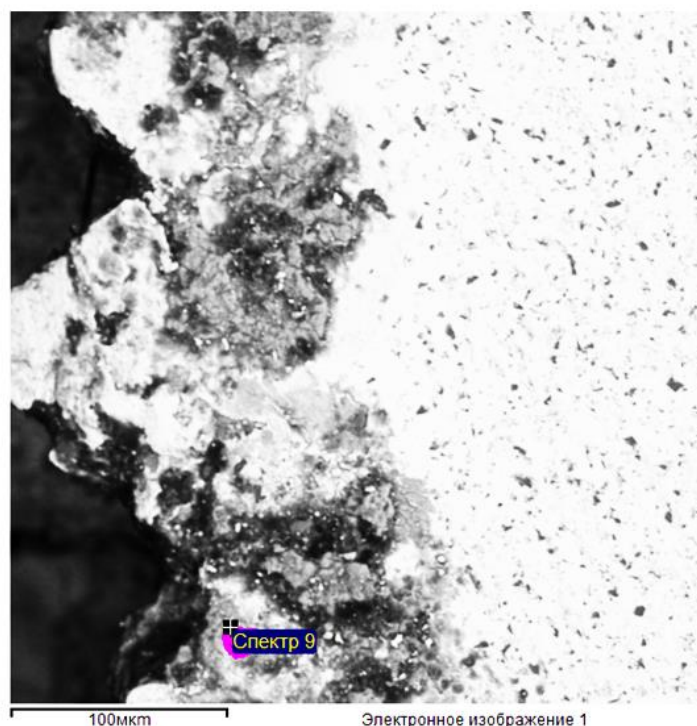
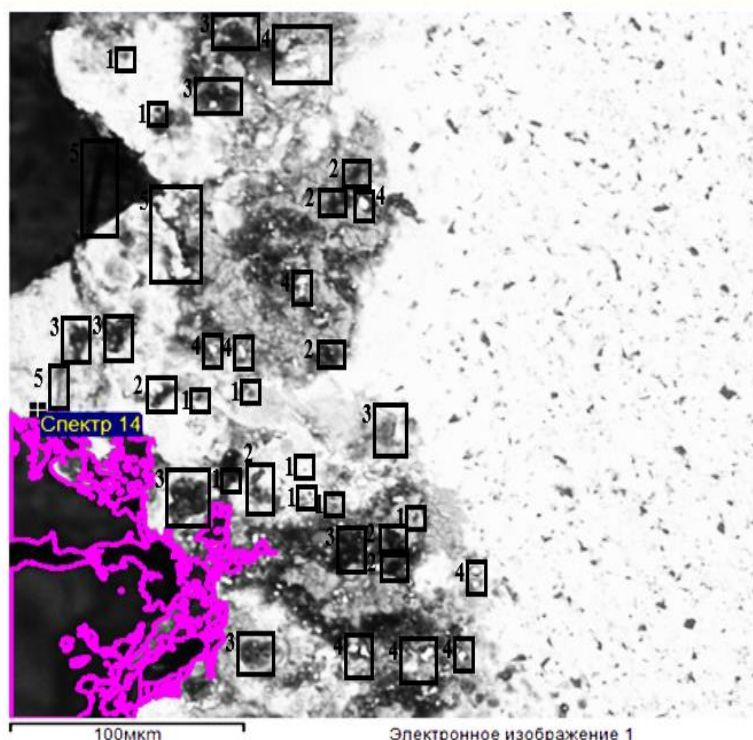


Рис. 5. Электронный снимок – спектр 9 в поврежденном участке змеевика, масштаб 1:100  
Fig. 5. Electronic micrograph – spectrum 9 in the affected area of the coiled-pipe, scale 1:100



**Рис. 6. Виды коррозии в переходной зоне коррозии: 1 – точечная коррозия (питтинг); 2 – коррозия язвами; 3 – коррозия пятнами; 4 – межкристаллитная коррозия; 5 – коррозия трещинами**  
**Fig. 6. Corrosion types in the corrosion transition zone 1 – pitting corrosion; 2 – crater corrosion; 3 – spot corrosion; 4 – intergranular corrosion; 5 – crack corrosion**

Учитывая климатические условия России, следует отметить, что некоторые регионы характеризуются высокой влажностью, вызывая общую коррозию, но при этом самым опасным типом коррозии является не общая, а местная питтинговая коррозия.

Анализируя полученные нами результаты электронных изображений участков змеевика, можно сделать следующие выводы:

- основным типом местной коррозии является точечная коррозия, а вторичным типом – электрохимическая коррозия;
- поскольку сплав змеевика содержит относительно низкое содержание хрома в своем составе, вероятно, что данный сплав менее устойчив к точечной коррозии, в связи с этим основным типом коррозии в материале змеевика и является точечная;
- высокая местная концентрация хлоридов на поврежденных (корродирован-

ных) участках по сравнению с чистыми (некорродированными) участками привела к растворению продуктов коррозии, таких как  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и наиболее важного соединения  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , отвечающего за защиту сплава змеевика благодаря нанесенному покрытию, что приводит к ухудшению защитного слоя и резкому ускорению коррозии глубоко внутри змеевика.

Следовательно, этот фактор является наиболее вероятной причиной разрушения или повреждения материала змеевика при аварии.

## 7. АНАЛИЗ МИКРОПРИМЕСЕЙ В ПРОБАХ ЗАПАДНО-СИБИРСКОЙ СЫРОЙ НЕФТИ

Содержание металлов и микропримесей в пробах Западно-Сибирской сырой нефти было определено методом атомно-абсорбционной спектроскопии, результаты которой приведены в табл. 8.

Из данных табл. 8 видно, что исследуемая проба Западно-Сибирской сырой нефти содержит значительное количество ванадия, алюминия и никеля.

## **8. ИЗУЧЕНИЕ КОРРОЗИИ СВАРНЫХ РАДИАНТНЫХ И КОНВЕКЦИОННЫХ ЗМЕЕВИКОВ В ЭЛЕКТРОЛИТЕ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИНГИБИТОРА СНПХ-6030 «Б»**

Ингибиторы коррозии, применяемые в различных технологических (металлургических, химических, горнорудных и т.п.) процессах доказали свою работоспособность в зависимости от различных условий среды и материала оборудования в снижении скорости коррозии исследуемых установок [9–11].

Химические ингибиторы коррозии могут быть очень эффективными для снижения скорости повреждения на 99% или более при соответствующей концентрации ис-

пользуемого ингибитора [12, 13], проявляющего свое защитное действие путем образования пленки на поверхности стали, при этом предотвращая коррозионную атаку [14]. В работе использовался специальный электролит, аналогичный составу солевого раствора, находящегося совместно с сырой нефтью внутри нефтяного пласта.

Эксперименты проводились при двух разных температурах: 100°C (с использованием подогревателя типа водяной бани) и 150°C (масляной бани) со специальным солевым электролитом состава, показанного в табл. 9, 10. В одном случае без использования ингибитора, а во втором варианте – с ингибитором с тремя различными его концентрациями,  $\times 10^{-4}$  масс.: 25, 50 и 200. Темплеты (пробные образцы) для определения скорости коррозии были изготовлены из материала змеевика, имеют размеры, приведенные в табл. 11. Солевой электролит был приготовлен из реактивов марки ОСЧ. Основные характеристики используемого ингибитора СНПХ-6030 «Б» показаны в табл. 12.

**Таблица 8**

**Содержание металлов в Западно-Сибирской сырой нефти**

**Table 8**

### ***Metal content in West Siberian crude oil***

| Металл                             | Fe   | V     | Al   | Ni    | As  | Zn   | Mn  | Co   | Cr   |
|------------------------------------|------|-------|------|-------|-----|------|-----|------|------|
| Содержание, $\times 10^{-4}$ масс. | 24,9 | 21,68 | 18,4 | 12,75 | 2,9 | 2,88 | 1,1 | 0,15 | 0,09 |

**Таблица 9**

**Ионный состав солевого электролита**

**Table 9**

### ***Salt electrolyte ion composition***

| Ионы                      | Na <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Cl <sup>-</sup> |
|---------------------------|-----------------|------------------|------------------|-------------------------------|-----------------|
| C, $\times 10^{-4}$ масс. | 115             | 12               | 0,972            | 3,8                           | 198,8           |

**Таблица 10**

**Химический состав солевого электролита**

**Table 10**

### ***Chemical composition of salt electrolyte***

| Химические соединения   | NaCl              | CaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O | MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O |
|-------------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| C, моль/дм <sup>3</sup> | $5 \cdot 10^{-3}$ | $3 \cdot 10^{-4}$                     | $4 \cdot 10^{-5}$                     |



Таблица 11

Размеры темплета змеевика

Table 11

Coiled-pipe template dimensions

| Размеры темплета, см                                | Длина  | Ширина | Толщина |
|-----------------------------------------------------|--------|--------|---------|
|                                                     | 5,2    | 2,7    | 0,13    |
| Общая площадь поверхности темплета, см <sup>2</sup> | 30,134 |        |         |

Таблица 12

Основные характеристики ингибитора СНПХ-6030 «Б»

Table 12

Main features of the inhibitor SNPH-6030 "B"

| Параметр                               | Значение параметра |
|----------------------------------------|--------------------|
| Содержание активного вещества, % масс. | 33–37              |
| Содержание фосфора, % масс.            | 0,15–0,32          |
| Содержание азота, % масс., не менее    | 0,13               |
| Температура застывания, °С, не выше    | -50                |

Все образцы были подвергнуты предварительной механической обработке: резке, шлифовке, полировке и травлению, взвешивались до и после контакта с соевым электролитом. Каждый темплет имел отверстие, которое необходимо, чтобы подвесить темплет внутри круглодонной колбы. Темплеты были полностью погружены в солевой электролит. Температура поддерживалась постоянной в течение всей продолжительности контакта образца с электролитом.

Потеря веса образца ( $\Delta m$ , мг) использовалась как показатель измерения скорости коррозии материала змеевика при двух температурах (100°C и 150°C), результаты скорости коррозии показаны на табл. 13.

Результаты экспериментов, которые приведены в табл. 13 и на рис. 7, показали,

что при введении в раствор ингибитора СНПХ-6030 «Б» потеря веса темплета снизилась ~ в 2 раза.

Из данных рис. 7 видно, что при повышении температуры потеря веса увеличивается в результате коррозии.

Эффективность применения данного ингибитора для замедления скорости коррозии материала змеевика при двух исследуемых температурах (100°C и 150°C) показана в табл. 14.

Результаты экспериментов, приведенные в табл. 14 и представленные на рис. 8, показали, что используемый ингибитор значительно снижает скорость коррозии, поэтому его рекомендуется использовать для защиты металлических элементов установок нефтеперерабатывающих заводов.

Таблица 13

Потеря веса темплета

Table 13

Template weight loss

| Продолжительность, ч | C, $\times 10^{-4}\%$ масс. | $\Delta m$ , мг (T = 100°C) |               | $\Delta m$ , мг (T = 150°C) |               |
|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|---------------|
|                      |                             | без ингибитора              | с ингибитором | без ингибитора              | с ингибитором |
| 3                    | 25                          | 30,54                       | 16,8          | 46,27                       | 25,4          |
| 24                   | 50                          | 15,85                       | 8,3           | 32,85                       | 17,5          |
| 48                   | 200                         | 3,76                        | 1,9           | 20,59                       | 10,7          |

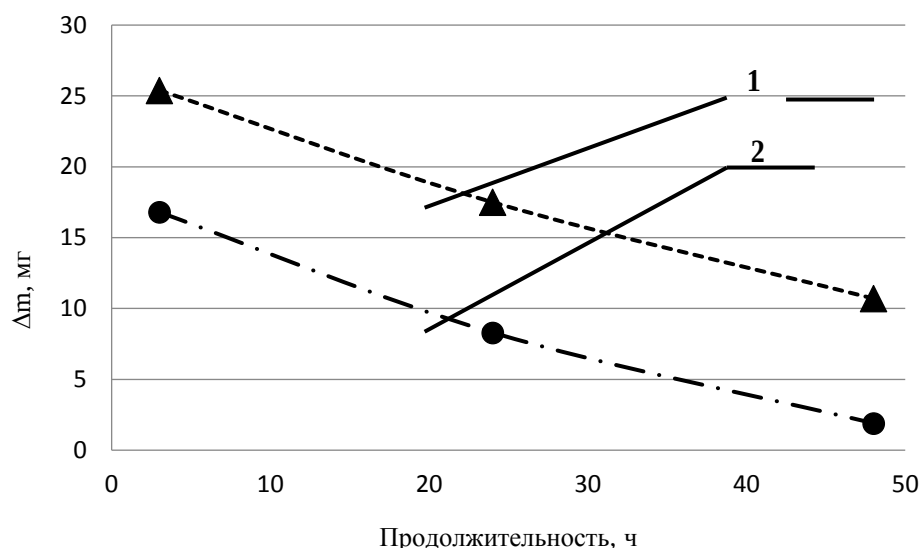


Рис. 7. Потеря веса темплета с применением ингибитора СНПХ-6030 «Б» в зависимости от продолжительности эксперимента при двух различных температурах: 1 – 150°C; 2 – 100°C  
Fig. 7. Template weight loss with the use of the inhibitor SNPH-6030 «B» depending on experiment duration at two different temperatures: 1 – 150°C; 2 – 100°C

Таблица 14

Эффективность применения ингибитора СНПХ-6030 «Б»  
и скорость коррозии ( $V_{корр}$ ) изучаемого темплета

Table 14

Effectiveness of the inhibitor SNPH-6030 «B» and the corrosion rate ( $V_{corr}$ )  
of the template under investigation

| Продолжительность, ч | C, $\times 10^{-4}$ % масс. | Эффективность, % |       | $V_{корр}$ , мг/дм <sup>2</sup> ·сут |          | $V_{корр}$ , мг/г    |                      |
|----------------------|-----------------------------|------------------|-------|--------------------------------------|----------|----------------------|----------------------|
|                      |                             | 100°C            | 150°C | 100°C                                | 150°C    | 100°C                | 150°C                |
| 3                    | 25                          | 81,82            | 82,16 | 121824                               | 181440   | $4,2 \cdot 10^{-5}$  | $6,4 \cdot 10^{-5}$  |
| 24                   | 50                          | 91,02            | 87,71 | 7516,8                               | 15552    | $2,7 \cdot 10^{-6}$  | $5,5 \cdot 10^{-6}$  |
| 48                   | 200                         | 97,94            | 92,48 | 864                                  | 4848,336 | $3,05 \cdot 10^{-7}$ | $1,72 \cdot 10^{-6}$ |

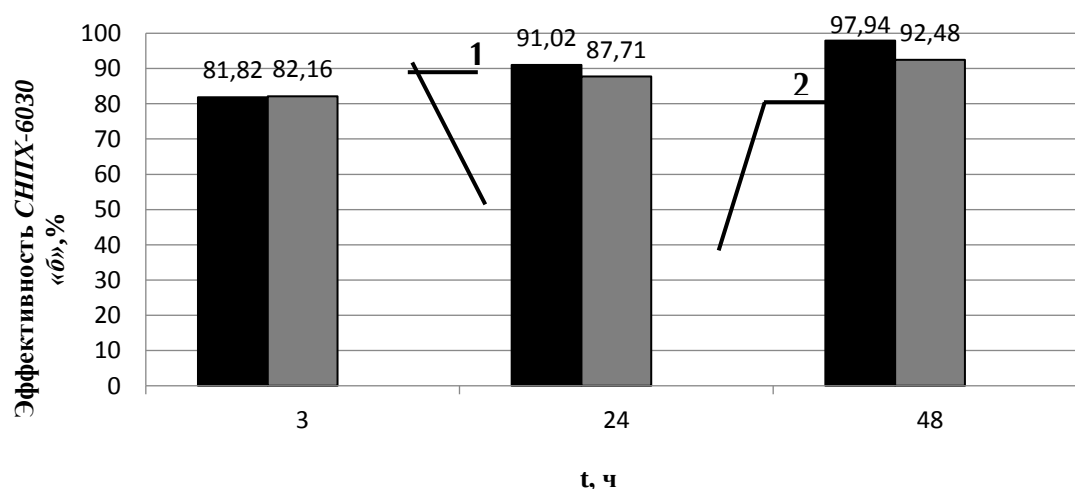


Рис. 8. Эффективность применения ингибитора СНПХ-6030 «Б» в зависимости от продолжительности эксперимента при двух разных температурах: 1 – 100°C; 2 – 150°C  
Fig. 8. Effectiveness of the inhibitor SNPH-6030 «B» depending on experiment duration at two different temperatures: 1 – 100°C; 2 – 150°C



Анализ диаграмм на рис. 8 показал, что положительные результаты эффективности применения ингибитора СНПХ – 6030 «Б» для снижения скорости коррозии материала змеевика были достигнуты при следующих условиях: продолжительность – 48 ч, концентрация ингибитора – 0,02% масс., температура – 100°C; при данных условиях эффективность применения рекомендованного ингибитора составила 97,94%.

Установлено, что недостаточно высокие показатели эффективности применения данного ингибитора для снижения скорости коррозии материала змеевика были достигнуты при следующих условиях: продолжительность – 3 ч, концентрация ингибитора –  $25 \times 10^{-4}$ % масс., температура – 100°C (эффективность применения ингибитора составила 81,82%).

Ингибитор СНПХ-6030 «Б» рекомендуется использовать в процессах переработки нефти на установке ЭЛОУ-АВТ-6, поскольку эффективность его применения может составлять до 98%.

## 9. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований выявлено, что наиболее вероятный тип местной коррозии в змеевиках – точечная коррозия, а вторичным типом локальной коррозии является электрохимическая. Механизм питтинговой коррозии носит харак-

тер необратимого процесса, который в конечном итоге приводит к ухудшению свойств металлических конструктивных элементов установок, используемых для переработки нефти.

Установлено, что поскольку материал змеевика (15Х5М – сталь мартенситного класса) содержит относительно низкое содержание хрома, то, вероятно, этот сплав менее устойчив к точечной коррозии.

Высокая местная концентрация хлоридов на поврежденных (корродированных) участках по сравнению с чистыми (некорродированными) участками приводит к растворению продуктов коррозии, таких как  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и наиболее важного компонента  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  (который отвечает за защиту сплава змеевика за счет покрытия поверхности). Это приводит к резкому повреждению глубоко внутри металла, что является наиболее вероятной причиной разрушения или повреждения материала змеевика при авариях<sup>2</sup>.

Доказано, что ингибитор СНПХ-6030 «Б» может успешно использоваться в процессах переработки нефти на установке ЭЛОУ-АВТ-6, поскольку его эффективность снижения скорости коррозии может достигать ~ 98%. При эксплуатации установок на нефтеперерабатывающих заводах защита от коррозии химическими веществами (ингибиторами) считается единственным и рациональным решением проблем коррозионного разрушения конструктивных элементов оборудования.

## Библиографический список

1. Попов Ю.А. Теория взаимодействия металлов и сплавов с коррозионно-активной средой. М.: Наука, 1995. 200 с.
2. Бурлов В.В., Альцыбеева А.И., Парпуц И.В. Защита от коррозии оборудования НПЗ. СПб.: ХИМИЗДАТ, 2005. 248 с.
3. Baranov A.N., Guseva E.A., Krasnoperov A.N., Pobedash A.S., Yudin A.N. Investigation of Corrosion Processes in Aluminum Production and Development of New Methods of Protection of Metals // Russ. J. of Non-Ferrous Metals. 2008. Vol. 49. No. 4. P. 264–268.
4. Власов С.Г., Немчинова Н.В., Шарафеева И.С. Исследование влияния рассолов рудника «Мир» на кор-

- розионную стойкость элементов горного оборудования // Чтения памяти В.Р. Кубачека. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сб. тр. XV Междунар. науч.-техн. конф. (г. Екатеринбург, 20–21 апреля 2017 г.). Екатеринбург, 2017. С. 359–362.
5. Эванс Ю.Р. Коррозия и окисление металлов. М.: Изд-во Машиностроительной лит., 1962. 857 с.
6. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondrat'ev V.V., Mazurenko V.V., Shcheglov E.L. Engineering Solutions for Cooling Aluminum Electrolyzer Exhaust Gases // Metallurgist. 2017. Vol. 60. No. 9–10. P. 973–977.

<sup>2</sup>Жук Н.П. Курс теории коррозии и защиты металлов: учеб. пособ. М.: Metallurgy. 1976. 472 с. / Zhuk N.P. Course of the theory of corrosion and protection of metals: Learning aids. Moscow: Metallurgy Publ., 1976, 472 p.

7. Гусева Е.А. Защита от коррозии оборудования газоочистки алюминиевых заводов // Перспективы развития технологии, экологии и автоматизации химических, пищевых и металлургических производств: матер. науч.-практ. конф. (г. Иркутск, 28–29 апреля 2005 г.). Иркутск, 2005. С. 37–39.  
8. Сухотин А.М., Шрейдер А.В., Арчакова Ю.И. Коррозия и защита химической аппаратуры. Нефтеперерабатывающая и нефтехимическая промышленность. М.: Химия, 1974. Т. 9. 576 с.  
9. Кузнецов Ю.И. Роль концепции комплексирования в современных представлениях об иницировании и ингибировании питтингообразования на металлах // Защита металлов. 2001. Т. 37. № 5. С. 485–490.  
10. Фархутдинова А.Р., Мукаддисов Н.И., Елпидинский А.А., Гречухина А.А. Составы ингибиторов коррозии для различных сред // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 4. С. 272–276.

11. Гусева Е.А., Хусанов А.И. Использование высоких технологий в процессах диффузионного насыщения поверхности металлических изделий // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (г. Иркутск, 26–27 апреля 2018 г.). Иркутск, 2018. С. 31–33.  
12. Ahmad Z. Principles of corrosion engineering and corrosion control. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books. 2006. 660 p.  
13. Miksic B., Shen M., Furman A., Kharshan R., Whited T. Vapor corrosion inhibitors for top of the line corrosion // Materials Performance. Vol. 52. No. 8. P. 56–60.  
14. Miksic B.M., Furman A.Y., Kharshan M.A. Effectiveness of the Corrosion Inhibitors for the Petroleum Industry Under Various Flow Conditions. Conference and Expo Corrosion 2009 (Houston, USA, 2009). Houston, 2009. 9 p. Paper no. 09573.

### References

1. Popov Yu.A. *Teoriya vzaimodeystviya metallov i splavov s korrozionno-aktivnoy sredoy* [The theory of metals and alloys interaction with a corrosive-active medium]. Moscow: Science Publ., 1995, 200 p. (In Russ.).  
2. Burlov V.V., Altsibeeva A.I., Parputs I.V. *Zashchita ot korrozii oborudovaniya NPZ* [Corrosion protection of oil refinery equipment]. Saint-Petersburg: KHIMIZDAT Publ., 2005, 248 p. (In Russ.).  
3. Baranov A.N., Guseva E.A., Krasnoperov A.N., Pobedash A.S., Yudin A.N. Investigation of Corrosion Processes in Aluminum Production and Development of New Methods of Protection of Metals. Russ. J. of Non-Ferrous Metals, 2008, vol. 49, no. 4, pp. 264–268.  
4. Vlasov S.G., Nemchinova N.V., Sharafееva I.S. *Issledovaniye vliyaniya rassolov rudnika «Mir» na korrozionnyuyu stoykost' elementov gornogo oborudovaniya* [Study of the effect of the Mir mine brines on corrosion resistance of mining equipment elements]. *Sbornik trudov XV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferencii «Chteniya pamyati V.R. Kubacheka. Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya gornoj i neftegazovoj promyshlennosti»* [Collected works of XV International scientific and technical conference “Readings in V.R. Kubachek’s memory”, Yekaterinburg, 20–21 April 2017], Yekaterinburg, 2017, pp. 359–362. (In Russ.).  
5. Evans Yu.R. *Korroziya i okisleniye metallov* [Corrosion and oxidation of metals]. Moscow: Publishing house of Machine-building literature. Publ., 1962, 857 p. (In Russ.).  
6. Shakhrai S.G., Nemchinova N.V., Kondrat’ev V.V., Mazurenko V.V., Shcheglov E.L. Engineering Solutions for Cooling Aluminum Electrolyzer Exhaust Gases. Metallurgist, 2017, vol. 60, no. 9–10, pp. 973–977.  
7. Guseva E.A. *Zashchita ot korrozii oborudovaniya gazoochistki alyuminiyevykh zavodov* [Corrosion protection of aluminum plant gas cleaning equipment]. *Materialy nauchno-prakticheskoy konferencii “Perspektivy razvitiya tekhnologii, ekologii i avtomatizacii himicheskikh,*

*pishchevyh i metallurgicheskikh proizvodstv”* [Proceedings of the scientific and practical conference “Development prospects of technology, ecology and automation of chemical food and metallurgical industries” Irkutsk, 28–29 April 2005]. Irkutsk, 2005, pp. 37–39 (In Russ.).  
8. Suhotin A.M., Shrejder A.V., Archakova Yu.I. *Korroziya i zashchita himicheskoy apparatury. Neftepererabatyvayushchaya i neftekhimicheskaya promyshlennost'* [Corrosion and protection of chemical equipment. Oil refining and petrochemical industry]. Moscow: Chemistry Publ., 1974, vol. 9, 576 p. (In Russ.).  
9. Kuznetsov Yu.I. Role of the complexation concept in modern ideas about pitting formation initiation and inhibition on metals. *Zashchita metallov* [Protection of Metals], 2001, vol. 37, no. 5, pp. 485–490. (In Russ.).  
10. Farhutdinova A.R., Mukatdisov N.I., Elpidinsky A.A., Grechukhina A.A. Compositions of corrosion inhibitors for various environments. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Herald of Kazan Technological University], 2013, no. 4, pp. 272–276 (In Russ.).  
11. Guseva E.A., Husanov A.I. *Ispol'zovanie vysokikh tekhnologij v processah dif-fuzionnogo nasyshcheniya poverhnosti metallicheskih izdelij* [Using high technologies in diffusion saturation of metal product surfaces]. *Materialy VIII Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhdunarodnym uchastiem “Perspektivy razvitiya tekhnologii pererabotki uglevodorodnyh i mineral'nyh resursov”* [Materials of VIII All-Russian scientific and practical conference with International participation “Development prospects of hydrocarbon and mineral resources processing technology”, Irkutsk, 26–27 April 2018]. Irkutsk, 2018, pp. 31–33. (In Russ.).  
12. Ahmad Z. Principles of corrosion engineering and corrosion control. Amsterdam: Elsevier Science & Technology Books, 2006, 660 p.  
13. Miksic B., Shen M., Furman A., Kharshan R., Whited T. Vapor corrosion inhibitors for top of the line corrosion. *Materials Performance*, 2013, vol. 52, no. 8, pp. 56–60.



14. Miksic B.M., Furman A.Y., Kharshan M.A. Effectiveness of the Corrosion Inhibitors for the Petroleum Industry Under Various Flow Conditions. Conference and

Expo Corrosion 2009 (Houston, USA, 2009). Houston, 2009, 9 p. Paper no. 09573.

#### **Критерии авторства**

Исса Б., Бажин В.Ю., Теляков Н.М., Теляков А.Н. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### **Authorship criteria**

Issa B., Bazhin V.Yu., Telyakov N.M. Telyakov A.N. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### **Conflict of interests**

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

#### **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ**

##### **Исса Башар,**

аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21 линия, 2, Россия,  
e-mail: basharissashtain@gmail.com

##### **Бажин Владимир Юрьевич,**

доктор технических наук, профессор,  
декан факультета переработки  
минерального сырья,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21 линия, 2, Россия,  
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

##### **Теляков Наиль Михайлович,**

доктор технических наук,  
профессор кафедры металлургии,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21 линия, 2, Россия,  
e-mail: telyakov\_nail@mail.ru

##### **Теляков Алексей Наилевич,**

кандидат технических наук,  
доцент кафедры металлургии,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21 линия, 2, Россия,  
e-mail: telyakov\_alexey@mail.ru

#### **INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

##### **Bashar Issa,**

Postgraduate student,  
St. Petersburg Mining University,  
2, 21 Line, Vasilievsky Ostrov,  
St. Petersburg 199106, Russia,  
e-mail: basharissashtain@gmail.com

##### **Vladimir Yu. Bazhin,**

Dr. Sci. (Eng.), Professor,  
Dean of the Faculty of Mineral Raw Material  
Processing,  
St. Petersburg Mining University,  
2, 21 Line, Vasilievsky Ostrov,  
St. Petersburg 199106, Russia,  
e-mail: bazhin-alfoil@mail.ru

##### **Nail M. Telyakov,**

Dr. Sci. (Eng.),  
Professor of the Metallurgy Department,  
St. Petersburg Mining University,  
2, 21 Line, Vasilievsky Ostrov,  
St. Petersburg 199106, Russia,  
e-mail: telyakov\_nail@mail.ru

##### **Aleksey N. Telyakov,**

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Metallurgy Department,  
St. Petersburg Mining University,  
2, 21 Line, Vasilievsky Ostrov,  
St. Petersburg 199106, Russia,  
e-mail: telyakov\_alexey@mail.ru



Оригинальная статья / Original article

УДК 669.714; 669.714.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.21285/1814-3520-2019-3-617-627>

## Расчет нагрева стального стержня, используемого при рафинировании технического алюминия

© М.П. Кузьмин\*, М.Ю. Кузьмина\*\*, В.Г. Григорьев\*\*\*, А.М. Касим\*\*\*\*

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

\*\*\*АО «СибВАМИ», г. Иркутск, Россия

\*\*\*\*Городской университет Гонконга, г. Гонконг, Китай

**Резюме:** Целью работы является расчет нагрева стального стержня (кристаллизатора), определение времени его нагревания до заданной температуры, а также температуры нагрева металла при частичном погружении в алюминиевый расплав. Проведен расчет нагрева стального стержня в алюминиевом расплаве в заданном интервале температур от 670 до 810°C. В ходе проведенных расчетов нагрева кристаллизатора предложен новый способ кристаллизационного рафинирования технического алюминия и обоснована его эффективность.

Предлагаемый способ заключается в выделении примесей железа и кремния из алюминиевого расплава путем резкого понижения его температуры за счет погружения в поверхностный слой металла массивного стального тела, выполняющего функцию кристаллизатора. Установлено, что разница между температурой конца стержня, погруженного в расплав (горячего конца), и температурой алюминиевого расплава (время выдержки стержня в расплаве – 30 с, глубина погружения – 5 см) находится в диапазоне 226–260°C. Наличие значительной разности температур между кристаллизатором и алюминиевым расплавом обуславливает возможность использования предлагаемого способа для реализации процесса глубокого рафинирования технического алюминия.

**Ключевые слова:** алюминий, технический алюминий, черновой алюминий, расплав, интерметаллические соединения, железо

**Информация о статье:** Дата поступления 19 февраля 2019 г.; дата принятия к печати 19 апреля 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю., В.Г. Григорьев, Касим А.М. Расчет нагрева стального стержня, используемого при рафинировании технического алюминия. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;23(3):617–627. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-617-627

## Calculation of heating of a steel rod used in technical aluminum refining

Mikhail P. Kuzmin, Marina Yu. Kuzmina, Vyacheslav G. Grigoriev, Abdul Mateen Qasim

Irkutsk National Research Technical University, Russia

SibVAMI JSC, Irkutsk, Russia

City University of Hong Kong, Hong Kong, China

**Abstract:** The purpose of the paper is to calculate heating of a steel rod (a crystallizer), determine its heating time up to the predetermined temperature and estimate the temperature to which the metal heats up if it is partially submerged in the aluminum melt. The heating of the steel rod immersed in the molten aluminum is calculated in the temperature range from 670 to 810°C. Based on the conducted calculations of the crystallizer heating, a new method of technical aluminum refining is proposed and its efficiency is substantiated. The presented method involves iron and silicon impurities extraction from the aluminum melt through its rapid cooling by the introduction of a massive steel body (a crystallizer) into the surface layer of metal. It is found out that the difference between the temperature of the rod end immersed in the melt (hot end) and the temperature of molten aluminum (rod holding time in the melt is 30s; immersion depth – 5 cm) is in the range of 226–260°C. Significant temperature head between the crystallizer and aluminum melt provides the possibility to use the proposed method for deep refining of technical aluminum.

**Keywords:** aluminum, technical aluminum, low grade aluminum, melt, intermetallic compounds, iron

**Information about the article:** Received February 19, 2019; accepted for publication April 19, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Kuzmin M.P., Kuzmina M.Yu., Grigoriev V.G., Qasim A.M. Calculation of heating of a steel rod used in technical aluminum refining. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(3):617–627. (In Russ.) DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-617-627

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Объективной основой повышения требований к чистоте алюминия является расширение областей его применения и усложнение условий эксплуатации изделий на его основе [1]. Из-за наличия в полуфабрикate неметаллических и интерметаллических включений, образующихся в системах «алюминий–металл», возникают дефекты (разрывы и трещины), связанные с пластической деформацией и ее влиянием на развитие и определение микроскопических дефектов литого металла<sup>1</sup>. Для устранения подобных дефектов (минимизации влияния интерметаллидов на свойства получаемых изделий) необходимо иметь четкое представление о природе интерметаллических включений, их свойствах и механизмах рафинирования для разработки объективных методов контроля их содержания в сплавах [2–4]. В связи с ростом требований потребителей к качеству алюминиевой продукции проблема разработки высокоэффективного способа рафинирования алюминия является актуальной для алюминиевой отрасли. Основное влияние на качество технического алюминия (наличие дефектов микро- и макроструктуры, усадочных дефектов) и его физико-механические свойства оказывают примеси интерметаллидов, главным образом, железа и кремния [5]. Негативное влияние данных элементов может проявляться при содержании последних в количестве 0,1 и 0,01% масс. соответственно. Увеличение содержания железа в алюминии в зависимости от концентрации других примесных элементов может приводить к снижению комплекса физических (электропроводность, коррозионная и химическая стойкость) или механических свойств (прочность, пластичность, относительное удлинение). Высокое содержание кремния, главным образом,

влияет на снижение пластичности алюминия, уменьшение его усталостной прочности, а также горячеломкости.

Проблема повышения качества алюминиевой продукции имеет особое значение для Иркутской области, поскольку на ее территории расположены предприятия ПАО «РУСАЛ Братск» (Братский алюминиевый завод) и филиал ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехове (Иркутский алюминиевый завод), а цветная металлургия является одной из основных отраслей промышленности региона и вносит существенный вклад в его экономическое развитие. На заводах алюминиевой промышленности перед выводом электролизеров на капитальный ремонт и в течение послепускового периода содержание железа в алюминии-сырце возрастает до 4 % масс., а кремния – до 0,5 % масс. В настоящее время единственным способом получения технического алюминия из «чернового» (реализуемого на практике) является его разубоживание алюминием более высоких марок.

Существуют способы очистки алюминия от примесей, они подразделяются на две группы:

- рафинирование алюминия от неметаллических включений и газов;
- рафинирование алюминия от примесей тяжелых металлов (Cr, Mn, Ti, V) [6].

Отдельным направлением очистки металлов от примесей является кристаллизационное рафинирование. Данный метод на сегодняшний день находит промышленное применение только в качестве зонной плавки, используемой для получения особо чистого алюминия (с содержанием примесей не более 0,001% масс.). В промышленности применяется только для получения алюминия [7–13]. Существующие методы кристаллизационного рафинирования не получили широкого распространения из-за

<sup>1</sup>Напалков В.И. Физико-химические процессы рафинирования алюминия и его сплавов: учеб. пособие. М.: Тепло-техник, 2011. 496 с. / Napalkov V.I. Physico-chemical processes of refining aluminum and its alloys: Learning aids. Moscow: Teplotekhnika Publ., 2011, 496 p. (In Russ.).



их низкой производительности и сложного технологического оформления. Однако среди преимуществ методов фракционной кристаллизации необходимо выделить высокую эффективность очистки металла, экологичность, низкую температуру процесса, а также невысокие затраты энергии при их реализации [10, 11].

В настоящее время среди исследователей большой научный и практический интерес вызывают перспективы расширения областей применения кристаллизационных способов рафинирования алюминия, повышения их эффективности, разработки аппаратного оформления для их промышленного применения. Так, в ходе проведения исследований было обнаружено, что основные принципы кристаллизационного рафинирования при определенных условиях могут быть успешно реализованы для рафинирования «чернового» металла (алюминия марки АВ) от примесей железа и кремния для получения алюминия технических марок. Таким образом, в работе [14] был предложен способ кристаллизационного рафинирования «чернового» алюминия. Данный способ заключается в совместной фракционной кристаллизации железа и кремния на поверхности массивного стального тела (кристаллизатора) за счет его резкого охлаждения.

## 2. ЦЕЛЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для реализации процесса рафинирования технического алюминия от основных примесей основным условием является то, чтобы температура кристаллизатора (стального стержня) была ниже температуры расплава [14]. Именно в этом случае на его более холодной поверхности кристаллизуется алюминий, обогащенный примесями. Жидкая фаза при этом характеризуется более высоким содержанием алюминия по сравнению с исходным расплавом. Для соблюдения данного условия и, как следствие, обес-

печения максимальной очистки металла от примесей являлось необходимым проведение расчета нагрева стального стержня при его полном погружении в алюминиевый расплав и при погружении в расплав только его части на различную глубину  $h$ .

Основными целями проведения расчета нагрева кристаллизатора являются следующие:

- 1) определение времени нагрева стержня до заданной температуры;
- 2) определение температуры, до которой нагревается металл при его частичном погружении в расплав на установленное время.

Конструкция стального стержня, используемого для рафинирования металла (кристаллизации примесных элементов на рабочей поверхности) показана на рис. 1.

Стержень был изготовлен из стали Ст3, которая относится к конструкционным углеродистым сталям обыкновенного качества и согласно ГОСТ 380–2005<sup>2</sup> содержит 0,14–0,2% масс. С [15]. Кристаллизационное рафинирование металла может быть осуществлено только в случае, если температура рабочей части стального стержня не превышает температуры расплавленного алюминия (греющей среды) [14]. В связи с этим был проведен комплекс расчетов температуры, равномерности и скорости нагрева стального стержня при:

- температуре греющей среды – алюминиевого расплава ( $t_0$ );
- времени выдержки стержня в расплаве ( $\tau$ );
- глубине погружения стержня в расплав ( $h$ ).

**Температура** нагрева представляет собой температуру металла (его поверхности), при которой, согласно установленным требованиям, он может быть извлечен из рабочего пространства печи [14]. Значение температуры нагрева зависит от химического состава сплава (его марки) и от цели нагрева.

<sup>2</sup>ГОСТ 380-2005. Сталь углеродистая обыкновенного качества. Марки. Обозначение. Введ. 01.01.2008 Федер. агентством по техн. регулированию и метрологии / GOST 380-2005. Commercial quality carbon steel. Grades. Nomenclature. Introduced 1 January 2008 by the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology.



Рис. 1. Внешний вид и габаритные размеры стального стержня-кристаллизатора  
Fig. 1. Physical configuration and dimensions of the steel rod – crystallizer

При нагреве образца металла допустимая разность температур по его сечению для сталей всех марок (за исключением высоколегированных) принимается, как  $\Delta t_{\text{кон}} = 200 \cdot \delta$  (если  $\delta \leq 0,1$  м;  $\delta$  – прогреваемая толщина металла)<sup>3</sup>.

Для рассматриваемого случая прогреваемая толщина металла соответствует диаметру ( $d$ ) погружаемой в расплав части стального стержня, составляющего  $1,3 \cdot 10^{-2}$  м. В связи с этим разность температур по сечению ( $\Delta t_{\text{кон}}$ ) при нагреве кристаллизатора составит  $2,6^\circ\text{C}$ . В сравнении с диапазоном температур греющей среды ( $670\text{--}810^\circ\text{C}$ ) значение  $\Delta t_{\text{кон}}$  чрезвычайно мало и стремится к нулю ( $\Delta t_{\text{кон}} \rightarrow 0$ ). Поэтому стальной стержень необходимо рассматривать как исследуемый в качестве термически обработанного тонкого тела.

**При нагреве** тонких тел термические напряжения могут не учитываться<sup>3</sup>. В связи с этим в рассматриваемом случае скорость нагрева не ограничивается внутренними факторами.

Режим нагрева представляет собой изменение во времени температуры поверхности центральной части металлического тела и температуры греющей среды<sup>3</sup>. При проведении экспериментальных исследований по выделению из алюминиевого расплава примесей Fe и Si температура греющей среды ( $t_0$ ) поддерживалась постоянной. Таким образом, в ходе рафинирования присутствует только одна ступень нагрева

стального стержня [7]. Это означает, что продолжительность нагрева кристаллизатора (термически тонкого тела) до заданной температуры является наименьшей.

**Нагрев термически тонкого тела при его полном погружении в алюминиевый расплав.** Для рафинирования использовался расплав технического алюминия массой 60 г. Перемешивание расплава осуществлялось с помощью путем вращения стального стержня, закрепленного на лабораторной мешалке IKA EUROSTAR 200 Control P4 (скорость вращения 1–65 об/мин).

После оценки термической массивности стального тела, подлежащего нагреву, и выбора графика нагрева проводился расчет температуры поверхности стального стержня ( $t$ ) в зависимости от времени его выдержки ( $\tau$ ) в расплаве при различных условиях. Определение времени нагрева кристаллизатора и его температуры осуществлялось в ходе решения уравнения, демонстрирующего, что все подведенное к поверхности нагреваемого тела тепло расходуется на изменение его энтальпии.

При определении температуры поверхности и времени нагрева стального стержня рассматривалась только конвективная теплоотдача к его поверхности от среды с постоянной температурой. В данном случае количество тепла ( $dQ$ ), получаемое телом с тепловоспринимающей поверхностью ( $F$ ) от среды с постоянной темпера-

<sup>3</sup>Гуляев А.П., Гуляев А.А. Металловедение: учеб. для вузов. 7-е изд., перераб. и доп. М.: Альянс, 2011. 643 с. / Gulyaev A.P., Gulyaev A.A. Metal science: Textbook for universities. 7<sup>th</sup> edition, revised and enlarged. Moscow: Alians, 2011, 643 p.



турой ( $t_0$ ) за время ( $d\tau$ ), определяется следующим образом<sup>3,4</sup> [14]:

$$dQ = \alpha_k \cdot (t_0 - t) \cdot F d\tau.$$

Поскольку тепло расходуется на изменение энтальпии стального стержня с массой ( $M$ ) и удельной теплоемкостью ( $c$ ), то

$$M \cdot c dt = \alpha_k \cdot (t_0 - t) \cdot F d\tau.$$

После интегрирования определено время нагрева от начальной ( $t_{нач}$ ) до конечной ( $t_{кон}$ ) температуры:

$$\tau = \frac{M \cdot c}{F \cdot \alpha_k} \int_{t_{нач}}^{t_{кон}} \frac{dt}{(t_0 - t)} = \frac{M \cdot c}{\alpha_k \cdot F} \cdot \ln \frac{t_0 - t_{нач}}{t_0 - t_{кон}}.$$

Решение обратной задачи, т.е. значение температуры нагреваемого стального стержня в момент времени  $\tau$  может быть получено из выражения (1):

$$t = t_0 + (t_{нач} - t_0) \exp \left( -\frac{\alpha_k \cdot F \cdot \tau}{c \cdot M} \right), \quad (1)$$

где  $t$  – температура поверхности стального стержня в зависимости от времени его выдержки ( $\tau$ ) в расплаве, °C;  $t_0$  – температура греющей среды (расплавленного алюминия), °C;  $t_{нач}$  – начальная температура;  $\tau$  – время выдержки стального стержня в расплавленном алюминии, с;  $F$  – тепловоспринимающая поверхность стального стержня, м<sup>2</sup>;  $\alpha_k$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·K);  $c$  – удельная теплоемкость стали, Дж/(кг·K) (табл. 1)<sup>3,4</sup>;  $M$  – масса стального стержня, кг.

Коэффициент теплоотдачи ( $\alpha_k$ ) – это величина, характеризующая интенсивность отдачи тепла и равная

$$\alpha_k = \frac{q}{\Delta t}, \quad (2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока (количество теплоты, передаваемое через единицу площади поверхности стального стержня за единицу времени);  $\Delta t$  – температурный напор (представляет собой модуль разности между температурой расплавленного металла и поверхностью стального стержня)<sup>5</sup>.

Таблица 1

Оценка теплофизических характеристик углеродистых сталей

Table 1

Evaluation of carbon steels thermophysical characteristics

| Характеристика                                            | Группа марок сталей                           | Температура, °C |      |      |      |      |      |      |      |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|
|                                                           |                                               | 100             | 200  | 300  | 400  | 500  | 600  | 700  | 800  |
| Средняя удельная теплоемкость от 0 до $t$ , °C, Дж/(кг·K) | Углеродистые                                  | 486             | 506  | 524  | 540  | 562  | 591  | 620  | 695  |
| Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·K)                    | Углеродистые: малоуглеродистые (0,05–0,20% C) | 55,6            | 52,6 | 48,6 | 45,0 | 40,8 | 37,1 | 34,2 | 30,2 |

<sup>4</sup>Кривандин В.А. Теплотехника металлургического производства: учеб. пособие в 2 т. / Т. 1. Теоретические основы. М.: МИСИС, 2002. 606 с. / Krivandin V.A. Heat engineering of metallurgical production: Training aids in 2 volumes / V. 1. Theoretical bases. Moscow: MISIS, 2002, 606 p.

<sup>5</sup>Кухлинг Х. Handbook of Physics / пер. с нем. под ред. Е.М. Лейкина. 2-е изд. М.: Мир, 1985. 519 с. / Kuhling H. Handbook of Physics/ translated from German under edition of E.M. Leikin. 2<sup>nd</sup> edition Moscow: Mir, 1985, 519 p. (In Russ.).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе был проведен расчет температуры поверхности стального стержня в зависимости от его размеров ( $h$ ) и времени выдержки ( $\tau$ ) в расплавленном алюминии при  $t_0 = 700^\circ\text{C}$ . Рассматривался случай полного погружения стального стержня диаметром  $d = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м и высотой ( $h$ :  $0,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $1,8 \cdot 10^{-2}$ ;  $3,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $5 \cdot 10^{-2}$  м) в расплавленный алюминий, температура которого составляла  $700^\circ\text{C}$ . Исследуемая система рассматривалась как изолированная, т.е. та, в которой не происходит обмена с внешней средой ни веществом, ни энергией<sup>5</sup>.

При конвективной теплоотдаче к поверхности нагреваемого стержня (сталь Ст3) значения коэффициента теплоотдачи ( $\alpha_k$ ) при  $t_0 = 700^\circ\text{C}$  составили 192,99; 74,83; 46,42; 32,45 кВт/(м<sup>2</sup>·К) при глубине погружения стержня ( $h$ )  $0,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $1,8 \cdot 10^{-2}$ ;  $3,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $5 \cdot 10^{-2}$  м, соответственно (табл. 2, рис. 2).

Определена средняя скорость нагрева стального стержня за рассматриваемый интервал времени (1 с) при различной глубине погружения стержня в расплав ( $h$ ) и температуре греющей среды  $t_0 = 700^\circ\text{C}$ . Средняя скорость нагрева образца составляла 680; 678,9; 659,7; 620,3 К/с при глубине погружения стержня  $0,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $1,8 \cdot 10^{-2}$ ;  $3,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $5 \cdot 10^{-2}$  м, соответственно.

Далее в работе был проведен расчет

температуры поверхности стального стержня высотой  $h$  в зависимости от температуры греющей среды ( $t_0$ ) и времени выдержки ( $\tau$ ) в расплавленном алюминии. Рассматривался случай полного погружения стального стержня диаметром  $d = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м и высотой  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м в расплавленный алюминий, температура которого составляла  $t_0$  ( $t_0$ : 670; 700; 740;  $810^\circ\text{C}$ ). Исследуемую систему также можно было рассматривать как изолированную<sup>5,6</sup> [15, 16].

Для стального стержня диаметром  $d = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м и высотой  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м рассчитанные значения коэффициента теплоотдачи ( $\alpha_k$ ) составили 32,12; 32,45; 32,89; 33,67 кВт/(м<sup>2</sup>·К) при температуре греющей среды ( $t_0$ ) 670; 700; 740;  $810^\circ\text{C}$ , соответственно (табл. 3).

Определена средняя скорость нагрева стального стержня высотой  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м за рассматриваемый интервал времени (1 с) при различных температурах греющей среды ( $t_0$ ). Средняя скорость нагрева образца составляла 591,5; 620,3; 651,3; 718,7 К/с при температурах расплавленного алюминия 670; 700; 740;  $810^\circ\text{C}$ , соответственно.

Очевидно, что чем выше температура греющей среды, тем больше плотность теплового потока к поверхности нагреваемого тела и тем выше скорость нагрева.

Таблица 2

**Температура поверхности стального стержня в зависимости от его размеров ( $h$ ) и времени выдержки ( $\tau$ ) в расплавленном алюминии при  $t_0 = 700^\circ\text{C}$**

Table 2

**The surface temperature of the steel rod depending on its size ( $h$ ) and exposure time ( $\tau$ ) in molten aluminum at  $t_0 = 700^\circ\text{C}$**

| Высота<br>стального<br>стержня,<br>$h \cdot 10^2$ , м | Время выдержки стального стержня, $\tau$ , с |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                                       | 0                                            | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1,0   | 1,5   | 2,0   | 3,0   | 4,0   |
| 0,3                                                   | 20                                           | 695,1 | 699,7 | 699,9 | 699,9 | ~ 700 | ~ 700 | ~ 700 | ~ 700 | ~ 700 | ~ 700 | ~ 700 | ~ 700 | ~ 700 | ~ 700 |
| 1,8                                                   | 20                                           | 400,9 | 544,9 | 619,3 | 654,4 | 676,8 | 685,7 | 692,5 | 696,1 | 697,9 | 698,9 | 699,9 | 699,9 | 699,9 | ~ 700 |
| 3,3                                                   | 20                                           | 265,6 | 403,8 | 497,2 | 555,7 | 592,3 | 625,5 | 648,4 | 664,3 | 671,2 | 679,7 | 696,5 | 699,4 | 699,9 | 699,9 |
| 5,0                                                   | 20                                           | 194,1 | 314,7 | 401,4 | 465,5 | 520,3 | 553,4 | 586,6 | 602,8 | 623,8 | 640,2 | 682,3 | 693,4 | 699,3 | 699,9 |

Примечание. Начальная температура, соответствующая температуре окружающей среды, составляет  $20^\circ\text{C}$ .



Таблица 3

Температура поверхности стального стержня высотой  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м  
в зависимости от температуры греющей среды ( $t_0$ ) (расплавленного алюминия)  
и времени выдержки ( $\tau$ ) в расплавленном алюминии

Table 3

The surface temperature of steel rod with a height  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  m depending on the temperature  
of heating medium ( $t_0$ ) (molten aluminum) and exposure time ( $\tau$ ) in molten aluminum

| Температура<br>греющей<br>среды $t_0$ , °C | Время выдержки стального стержня, $\tau$ , с |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                                            | 0                                            | 0,1   | 0,2   | 0,3   | 0,4   | 0,5   | 0,6   | 0,7   | 0,8   | 0,9   | 1,0   | 1,5   | 2,0   | 3,0   | 4,0   |
| 670                                        | 20                                           | 184,9 | 299,6 | 382,1 | 443,4 | 495,9 | 527,7 | 559,5 | 575,3 | 595,5 | 611,4 | 652,4 | 663,4 | 669,3 | 669,9 |
| 700                                        | 20                                           | 194,1 | 314,7 | 401,4 | 465,5 | 520,3 | 553,4 | 586,6 | 602,8 | 623,8 | 640,2 | 682,3 | 693,4 | 699,3 | 699,9 |
| 740                                        | 20                                           | 206,5 | 335,2 | 427,3 | 495,3 | 543,0 | 588,9 | 611,8 | 639,8 | 661,7 | 671,3 | 718,8 | 733,4 | 739,4 | 739,9 |
| 810                                        | 20                                           | 228,7 | 371,8 | 465,0 | 536,7 | 600,4 | 636,3 | 674,9 | 694,7 | 719,3 | 738,7 | 788,6 | 799,2 | 808,7 | 809,8 |

Примечание: Начальная температура, соответствующая температуре окружающей среды, составляет 20°C.

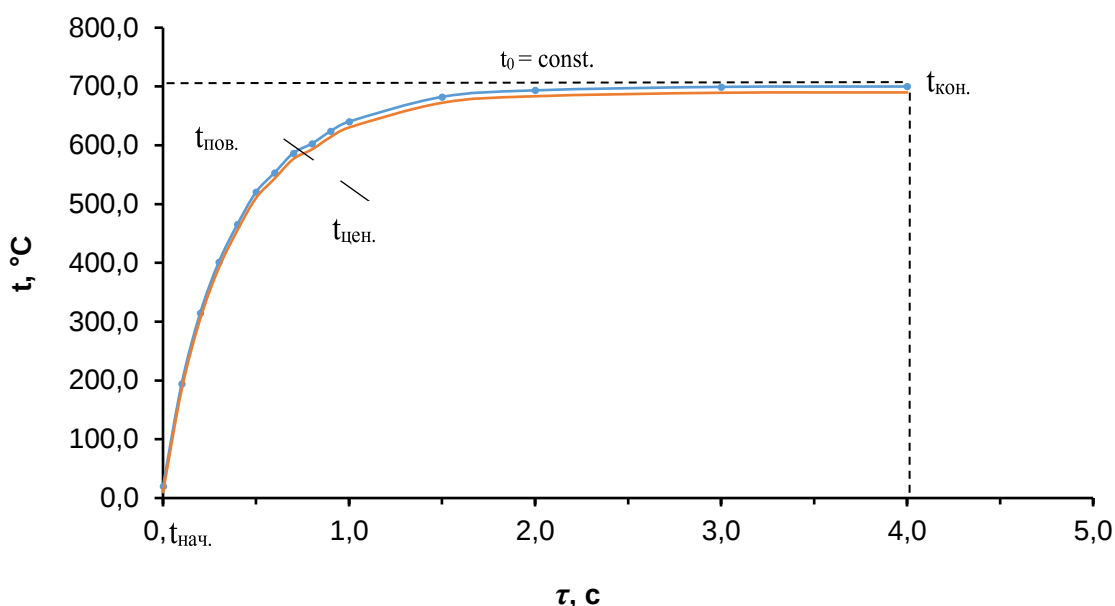


Рис. 2. Режим нагрева стального стержня высотой  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м;

$t_0$ ,  $t_{пов.}$ ,  $t_{цен.}$ ,  $t_{нач.}$ ,  $t_{кон.}$  – температуры расплавленного алюминия ( $t_0 = 700^\circ\text{C}$ ), поверхности стержня, центра стержня, начальная и конечная  $t$

Fig. 2. Heating mode of the steel rod with the height  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  m:

$t_0$ ;  $t_{surf}$ ;  $t_{cent}$ ;  $t_{init}$ ;  $t_{fin}$ ; – temperatures of molten aluminum ( $t_0 = 700^\circ\text{C}$ ), rod surface, centre of the rod; initial and finishing temperature

**Нагрев термически тонкого тела при погружении в алюминиевый расплав его части.** Как и в предыдущих случаях перемешивание алюминиевого расплава массой 60 г осуществлялось в ходе вращения стального стержня (см. рис. 1). Скорость вращения стержня также оставалась неизменной.

В процессе рафинирования глубина погружения стержня ( $h$ ) в расплав алюминия менялась от  $0,3 \cdot 10^{-2}$  до  $5 \cdot 10^{-2}$  м. Свободный конец стержня оставался на воздухе ( $t = 20^\circ\text{C}$ ). Исследуемая система аналогично предыдущему случаю рассматривалась в качестве закрытой<sup>4,5,6</sup> [15, 16]. Температура холодного конца стержня ( $t_{х.к.}$ ) в процессе

эксперимента измерялась термопарой. В табл. 4 приведены измеренные температуры холодного конца стального стержня при различных температурах греющей среды ( $t_0$ : 670; 700; 740; 810°C), времени выдержки стержня  $\tau = 30$  с, высоте погружения стержня  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м и температуре окружающей среды  $t_{нач.} = 20^\circ\text{C}$ .

При наличии градиента температуры возникает явление теплопроводности, которое в одномерном стационарном случае ( $t = t(x)$ ) можно описать уравнением Фурье<sup>5</sup>:

$$dQ = -K \cdot \frac{dt}{dx} dS d\tau,$$

где  $dQ$  – количество теплоты, переносимое за время  $d\tau$  через площадку  $dS$  в направлении нормали  $x$  к этой площадке в сторону убывания температуры;  $\frac{dt}{dx}$  – градиент температуры;  $K$  – коэффициент теплопроводности равный количеству теплоты, переносимому через единицу поверхности за единицу времени при градиенте температуры равном единице.

Знак минус указывает на то, что теплота передается в направлении уменьшения температуры<sup>3,6</sup> [15, 17].

Основываясь на уравнении Фурье, можно определить разность температур между холодным и искомым горячим концами стального стержня:

$$\Delta t = - \frac{\Delta Q \cdot \Delta x}{K \cdot S \cdot \tau}, \quad (3)$$

где  $\Delta t$  – разность температур ( $^\circ\text{C}$ ) между холодным ( $t_{х.к.}$ ) и горячим концами стального стержня ( $t_{см}$ ), ( $\Delta t = t_{х.к.} - t_{см}$ );  $\Delta Q$  – переносимое количество теплоты (Дж), равное разности теплосодержаний расплавленного алюминия ( $Q_{Al}$ ), находящегося при температуре  $t_0$  и погруженной в расплав части стального стержня ( $Q_{см}$ ), имеющей температуру  $t_{х.к.}$ .

$$\Delta Q = Q_{Al} - Q_{см}.$$

Рассчитанные значения  $\Delta Q$  составляли 47555,7; 50169,7; 53771,6; 60329,2 Дж

при температурах расплавленного алюминия  $t_0$ , соответственно, 670; 700; 740; 810°C и температурах холодного конца стержня,  $t_{х.к.}$ , соответственно, 25; 30; 35; 42°C.

$\Delta x$  – нормаль к площадке  $S$ , через которую происходит перенос теплоты  $\Delta Q$  в сторону убывания температуры, м.  $\Delta x = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м.

$K$  – коэффициент теплопроводности стали марки Ст3, Вт/(м<sup>2</sup>·К) (см. табл. 1)<sup>3,4</sup>.

$\tau$  – время выдержки стержня,  $\tau = 30$  с.

$S$  – площадка, через которую происходит перенос теплоты  $\Delta Q$ , м<sup>2</sup>.

$$S = 2 \cdot h \cdot d = 13 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2,$$

где  $d$  – диаметр погруженной в алюминий части стального цилиндра, м ( $d = 1,3 \cdot 10^{-2}$  м);  $h$  – глубина погружения стержня, м ( $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м).

Результаты расчетов температуры поверхности, погруженной в расплав части стального стержня в зависимости от температуры греющей среды  $t_0$  (расплавленного алюминия) представлены в табл. 4.

**Равномерность нагрева** ( $\Delta t_{кон}$ ) определяется величиной разности температур между поверхностью и центром образца.

$$\Delta t_{кон} = t_{кон}^{пов} - t_{кон}^{цен}.$$

Для стального стержня, выполненного из стали марки Ст3, равномерность нагрева составила 2,6°C. Таким образом, температура центра горячего конца стержня, погруженного на глубину  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м в расплавленный алюминий, нагретый до температуры  $t_0$ , равной 670; 700; 740; 810°C, будет составлять, соответственно, 411,4; 437,4; 472,4; 581,4°C.

Процесс выравнивания температуры по сечению стержня происходит при выдержке его в расплавленном алюминии при температуре эксперимента в течение 1–2 мин. Кроме того, при извлечении стального стержня из расплава алюминия неизбежно происходит выравнивание температуры по сечению образца в связи с отдачей тепла в окружающую среду с его поверхности и теплопроводностью внутри металла.



Таблица 4

Изменение температуры стального стержня в зависимости  
от температуры греющей среды  $t_0$

Table 4

Steel rod temperature variation depending on the temperature of the heating medium  $t_0$

| Стальной стержень (Сталь Ст3)                        | Температура расплавленного алюминия, $t_0$ , °C |     |     |     |
|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-----|-----|-----|
|                                                      | 670                                             | 700 | 740 | 810 |
| Температура холодного конца стержня, $t_{х.к.}$ , °C | 25                                              | 30  | 35  | 42  |
| Температура горячего конца стержня, $t_{г.к.}$ , °C  | 414                                             | 440 | 475 | 584 |

Примечание: Время выдержки стержня  $\tau = 30$  с; глубина погружения стержня  $h = 5 \cdot 10^{-2}$  м; температура окружающей среды  $t_{нач.} = 20^\circ\text{C}$ .

Полученная разница между температурой горячего конца стержня и температурой расплавленного алюминия при времени его выдержки в расплаве (30 с) и глубине погружения ( $5 \cdot 10^{-2}$  м) составила  $226\text{--}265^\circ\text{C}$ . В отличие от полного погружения стержня в расплав (при наличии теплообмена с окружающей средой) температура горячего конца стального стержня ( $t_{г.к.}$ ) никогда не достигнет температуры расплавленного алюминия ( $t_0$ ). Значительная разность температур обуславливает возможность использования предлагаемого способа для проведения процесса рафинирования технического алюминия.

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В работе оценена степень термической массивности подлежащего нагреву металла кристаллизатора и выбран график его нагрева. Исследуемый стержень – кристаллизатор (выполненный из стали марки Ст3) может быть рассмотрен как термически тонкое тело<sup>2</sup>. При проведении рафинирования технического алюминия использовался одноступенчатый режим нагрева тонкого тела (стального стержня).

2. Проведен расчет времени нагрева стального стержня (кристаллизатора) до заданной температуры при его частичном и полном погружении в алюминиевый расплав.

3. Установлена зависимость температуры поверхности кристаллизатора от его размеров и времени выдержки в алюминиевом расплаве ( $t = 700^\circ\text{C}$ ). В случае полного

погружения стержня в алюминиевый расплав, в зависимости от высоты рассматриваемого стального цилиндра ( $h = (0,3\text{--}5) \cdot 10^{-2}$  м), время его нагрева до температуры греющей среды ( $t_0 = 700^\circ\text{C}$ ) составило  $0,5\text{--}4,0$  с.

4. Определена температура поверхности стального стержня высотой  $5 \cdot 10^{-2}$  м в зависимости от температуры греющей среды и времени выдержки в расплавленном алюминии. В случае полного погружения стержня в алюминиевый расплав, в зависимости от температуры расплавленного алюминия ( $t_0 = 670\text{--}810^\circ\text{C}$ ), время его нагрева до температуры греющей среды ( $t_0$ ) составило более 4 с. Установлено, что в случае полного погружения стержня в алюминиевый расплав время его нагрева до температуры греющей среды ( $t_0 = 670\text{--}810^\circ\text{C}$ ) составило  $\sim 4$  с.

5. Определена равномерность нагрева стального стержня и разность температур по его сечению ( $\Delta t_{\text{кон}}$ ), значение которой составило  $2,6^\circ\text{C}$ .

6. Определена скорость нагрева стального стержня при различных температурах греющей среды и глубине погружения стержня в расплав.

7. Проведен расчет нагрева стального стержня в случае его частичного погружения в расплавленный алюминий. Установлено, что в случае частичного погружения стержня в расплав разница между температурами горячего конца и расплавленного металла составила  $226\text{--}260^\circ\text{C}$ . Наличие существенной разности температур обуславливает возможность использования метода глубокой очистки технического алюминия от примесей.

### Библиографический список

1. Белов Н.А. Фазовый состав промышленных и перспективных алюминиевых сплавов. М.: Изд. Дом МИСиС, 2010. 509 с.
2. Mukuna P. Mubiayi, Esther T. Akinlabi Characterization of the intermetallic compounds in aluminium and copper friction stir spot welds // *Materials Today: 5th International Conference of Materials Processing and Characterization*. (Hyderabad, India, 5–7 December 2017). Hyderabad, 2017. Vol. 4. Issue 2. Part A. P. 533–540.
3. Li M., Tamura T., Omura N., Murakami Yu., Tada Sh., Miwa K., Takahashi K. Refinement of intermetallic compounds and aluminum matrix in 3xxx aluminum alloys solidified by an electromagnetic vibration technique // *Journal of Alloys and Compounds*. 2014. Vol. 610. P. 606–613.
4. Utigard T. Thermodynamic considerations of aluminum refining and fluxing // *Extraction, refining, and fabrication of light metals: Proceedings of the international symposium on extraction, refining and fabrication of light metals* (Ottawa, Canada, 18–21 August 1991). Ottawa, 1991. P. 353–365.
5. Begunov A.I., Kuz'min M.P. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminum // *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*. 2014. Т. 7. № 2. С. 132–137.
6. Пат. 2006-356229 Япония, МПК C22B 21/06, C22B 9/02. Метод рафинирования алюминия и устройство для рафинирования / Ешида Катсуоки; заявл. 25.07.2005; опубл. 28.12.2006.
7. Пат. 2002-155322, Япония, МПК C22B 21/06, C22B 9/02, C22B 9/05, C22B 9/10. Метод и устройство для рафинирования алюминия или его сплавов / Урагами Шиничиро, Мошида Минору, Канамори Теруми; заявл. 15.11.2000; опубл. 31.05.2002.
8. Пат. 2234545, Российская Федерация, МПК C22B 21/06, C22B 9/02. Способ очистки алюминия методом сегрегации и устройство для его осуществления / Ле-руа Мишель; заявитель и патентообладатель Алюминий Пешины; заявл. 27.05.2003; опубл. 20.08.2004.
9. Alvarez F.J., Pasquevich D.M., Bohe A.E. Comparative analysis of the chlorination of mixtures iron–aluminum and the binary alloy FeAl3 // *Journal of Alloys and Compounds*. 2006. Vol. 424. P. 78–87.
10. Jun Wang Chong, Chen Baode Sun Effects of electros slag refining on removal of iron impurity and alumina inclusions from aluminum // *ICAA13 Pittsburgh*. 2012. P. 207–212.
11. Humberto Lopes de Moraes, José Roberto de Oliveira, Denise Crocce Romano Espinosa, Jorge Alberto Soares Tenório. Removal of iron from molten recycled aluminum through intermediate phase filtration // *Materials transactions*. 2006. Vol. 47. P. 1731–1736.
12. Khalifa W., Samuel F.H., Gruzleski J.E. Crystallization behavior of iron-containing intermetallic compounds in 319 aluminum alloy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2003. Vol. 34. P. 807–825.
13. Пат. 2593881, Российская Федерация, МПК C22B21/06 Способ очистки технического алюминия / А.И. Бегунов, М.П. Кузьмин; заявитель и патентообладатель Иркутский национальный исследовательский технический университет; заявл. 08.04.2015; опубл. 10.08.2016. Бюл. № 22.
14. Chong Chen, Jun Wang, Da Shu, Jing Xue, Bao-de Sun, Yong-sheng XUE, Qing-min YAN Iron reduction in aluminum by electros slag refining // *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. 2012. Vol. 22, Issue 4. P. 964–969.
15. Ливанов Д.В. Физика металлов. М.: МИСиС, 2006. 279 с.
16. Chen Chong, Wang Jun, Shu Da, Xue Jing, Sun Bao-de, Xue Yong-sheng, Yan Qing-min Iron reduction in aluminum by electros slag refining // *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. 2012. Vol. 22. P. 964–969.
17. Lifeng Zhang, Jianwei Gao, Lucas Nana Wiredu Damoah, Robertson D.G. Removal of iron from aluminum: A review // *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*. 2011. Vol. 33. Issue 2. P. 99–157.

### References

1. Belov N.A. Fazovyy sostav promyshlennykh i perspektivnykh alyuminievykh splavov [Phase composition of industrial and prospective aluminium alloys]. Moscow: Dom Publ. MISiS, 2010, 509 p. (In Russ.).
2. Mubiayi M.P., Akinlabi E.T. Characterization of the intermetallic compounds in aluminium and copper friction stir spot welds. *Materials Today: 5th International Conference of Materials Processing and Characterization* [Hyderabad, India, 5–7 December 2017]. Hyderabad, 2017, vol. 4. issue 2, part a, pp. 533–540.
3. Li M., Tamura T., Omura N., Murakami Yu., Tada Sh., Miwa K., Takahashi K. Refinement of intermetallic compounds and aluminum matrix in 3xxx aluminum alloys solidified by an electromagnetic vibration technique. *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, vol. 610, pp. 606–613.
4. Utigard T. Thermodynamic considerations of aluminum refining and fluxing // *Extraction, refining, and fabrication of light metals: Proceedings of the international symposium on extraction, refining and fabrication of light metals* (Ottawa, Canada, 18–21 August 1991). Ottawa, 1991, pp. 353–365.
5. Begunov A.I., Kuz'min M.P. Thermodynamic stability of intermetallic compounds in technical aluminum. *Journal of Siberian Federal University. Engineering and Technologies*, 2014, vol. 7, no. 2, pp. 132–137.
6. Eshida Katsuoki *Metod rafinirovaniya alyuminiya i ustrojstvo dlya rafinirovaniya* [Aluminum refining method and a refining device]. Patent Japan, no. 2006-356229, 2006.
7. Uragami Shinichiro, Moshida Minoru, Kanamori Terumi. *Metod i ustrojstvo dlya rafinirovaniya alyuminiya*



*ili ego splavov* [Method and a device for refining aluminum or its alloys]. Patent Japan, no. 2002-155322, 2002.

8. Lerua Mishel' *Sposob ochistki alyuminiya metodom segregatsii i ustrojstvo dlya ego osushchestvleniya* [Method of aluminum purification by segregation and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2234545, 2004.

9. Alvarez F.J., Pasquevich D.M., Bohe A.E. Comparative analysis of the chlorination of mixtures iron-aluminum and the binary alloy FeAl<sub>3</sub>. *Journal of Alloys and Compounds*. 2006, vol. 424, pp. 78–87.

10. Jun Wang Chong, Chen Baode Sun Effects of electroslag refining on removal of iron impurity and alumina inclusions from aluminum. *ICAA13 Pittsburgh*, 2012, pp. 207–212.

11. Humberto Lopes de Moraes, José Roberto de Oliveira, Denise Crocce Romano Espinosa, Jorge Alberto Soares Tenório. Removal of iron from molten recycled aluminum through intermediate phase filtration. *Materials transactions*, 2006, vol. 47, pp. 1731–1736.

12. Khalifa W., Samuel F.H., Gruzleski J.E. Crystallization behavior of iron-containing intermetallic compounds

in 319 aluminum alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003, vol. 34, pp. 807–825.

13. Begunov A.I., Kuz'min M.P. *Sposob ochistki tekhnicheskogo alyuminiya* [Purification method for technical aluminium]. Patent RF, no. 2593881, 2016.

14. Chong Chen, Jun Wang, Da Shu, Jing Xue, Bao-de Sun, Yong-sheng Xue, Qing-min YAN Iron reduction in aluminum by electroslag refining. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*, 2012, vol. 22, issue 4, pp. 964–969.

15. Livanov D.V. *Fizika metallov*. Moscow: MISiS Publ., 2006, 279 p. (In Russ.).

16. Chen Chong, Wang Jun, Shu Da, Xue Jing, Sun Bao-de, Xue Yong-sheng, Yan Qing-min Iron reduction in aluminum by electroslag refining. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, vol. 22, pp. 964–969.

17. Lifeng Zhang, Jianwei Gao, Lucas Nana Wiredu Damoah, Robertson D.G. Removal of iron from aluminum: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 2011, vol. 33, issue 2, pp. 99–157.

#### Критерии авторства

Кузьмин М.П., Кузьмина М.Ю., Григорьев В.Г., Касим А.М. имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

#### Authorship criteria

Kuzmin M.P., Kuzmina M.Yu., Grigoriev V.G., Qasim A.M. have equal authors rights and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### Conflict of interests

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

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

##### Кузьмин Михаил Петрович,

кандидат технических наук,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: mike12008@yandex.ru; kmp@istu.edu

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

##### Mikhail P. Kuzmin,

Cand. Sci. (Eng.),  
Associate Professor of the Non-Ferrous  
Metals Metallurgy Department,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: mike12008@yandex.ru; kmp@istu.edu

##### Кузьмина Марина Юрьевна,

кандидат химических наук,  
доцент кафедры металлургии цветных металлов,  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет,  
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, Россия,  
e-mail: kuzmina.my@yandex.ru

##### Marina Yu. Kuzmina,

Cand. Chemical (Eng.),  
Associate Professor of the Non-Ferrous  
Metals Metallurgy Department,  
Irkutsk National Research Technical University,  
83 Lermontov St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: kuzmina.my@yandex.ru

##### Григорьев Вячеслав Георгиевич,

кандидат технических наук,  
генеральный директор,  
АО «СибВАМИ»,  
664074, г. Иркутск, ул. Советская, 55, Россия,  
e-mail: vyacheslav.grigoriev2@rusal.com

##### Vyacheslav G. Grigoriev,

Cand. Sci. (Eng.),  
Director General, SibVAMI JSC,  
55 Sovetskaya St., Irkutsk 664074, Russia,  
e-mail: vyacheslav.grigoriev2@rusal.com

##### Касим Абдул Матин,

научный сотрудник физического факультета,  
Городской университет Гонконга,  
г. Гонконг, п-ов Каулун, ул. Тат Чи Авеню, Китай,  
e-mail: amqasim2-c@my.cityu.edu.hk

##### Abdul Mateen Qasim,

PhD, Researcher of the Faculty of Physics,  
City University of Hong Kong,  
83 Tat Chee Ave, Hong Kong, Kowloon, China,  
e-mail: amqasim2-c@my.cityu.edu.hk



## Синтез магниевых лигатур при металлотермическом восстановлении соединений редкоземельных металлов

© С.А. Савченков\*, В.Л. Уголков\*\*

\*Санкт-Петербургский горный университет, г. Санкт-Петербург, Россия

\*\*Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова, г. Санкт-Петербург, Россия

**Резюме:** Цель – изучение процесса получения лигатур «Mg-редкоземельные металлы» и определение перечня факторов магниетермического процесса для выявления оптимальных технологических режимов. В работе использованы различные современные методы анализа: рентгенофлуоресцентный проведен с помощью последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 («Shimadzu», Япония); идентификация фаз выполнялась с применением рентгеновского порошкового дифрактометра XRD-6000 («Shimadzu», Япония); комплексный термический проводился на установке STA 429 CD («NETZSCH», Германия) в алундовых тиглях с крышками в потоке аргона (с использованием держателя тиглей). В результате металлотермического восстановления неодима и гадолиния из фторидно-хлоридных расплавов магнием получены лигатуры «Mg-редкоземельные металлы» с различным процентным содержанием легирующих элементов. Предлагаемый способ восстановления редкоземельных металлов из фторидно-хлоридных расплавов позволяет извлекать неодим и гадолиний в процентном соотношении до 97,4%. Полученные лигатуры характеризуются однородностью и жидкотекучестью, что способствует их равномерной разливке по изложницам.

**Ключевые слова:** магниевые лигатуры, синтез лигатур, неодим, гадолиний, металлотермическое восстановление, фторидно-хлоридные расплавы

**Информация о статье:** Дата поступления 6 мая 2019 г.; дата принятия к печати 31 мая 2019 г.; дата онлайн-размещения 28 июня 2019 г.

**Для цитирования:** Савченков С.А., Уголков В.Л. Синтез магниевых лигатур при металлотермическом восстановлении соединений редкоземельных металлов. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019;25(3):628–639. DOI: 10.21285/1814-3520-2019-3-628-639

## Synthesis of magnesium master alloys under metallothermic reduction of rare earth metal compounds

Sergey A. Savchenkov, Valery L. Ugolkov

Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

I.V. Grebenshchikov Institute of silicate chemistry, Saint-Petersburg, Russia

**Abstract:** The purpose of the paper is to study the process of obtaining Mg-REM master alloys and determine the list of factors of the metallothermic magnesium process in order to identify optimal technological regimes. The study uses different modern methods of analysis. The X-ray fluorescence analysis was carried out using the XRF-1800 sequential X-ray fluorescence spectrometer (Shimadzu, Japan). Phase identification was performed with the use of the X-ray powder diffractometer XRD-6000 (Shimadzu, Japan). The complex thermal analysis was carried out using the STA 429 CD (NETZSCH, Germany) installation in alundum crucibles with lids in the argon stream using a Tg+DTA crucible holder. Master alloys of Mg-REM with different percentages of alloying elements have been obtained as a result of the metallothermic magnesium reduction of neodymium and gadolinium from fluoride-chloride melts. The proposed method of REM reduction from fluoride-chloride melts allows to extract neodymium and gadolinium in a percentage up to 97.4%. The obtained master alloys are homogeneous and fluid, well poured into molds.

**Keywords:** magnesium master alloys, master alloy synthesis, neodymium, gadolinium, metallothermic recovery, fluoride-chloride melts

**Information about the article:** Received May 6, 2019; accepted for publication May 31, 2019; available online June 28, 2019.

**For citation:** Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. Synthesis of magnesium master alloys under metallothermic reduction of rare earth metal compounds. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* = *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;25(3):628–639. (In Russ.) 10.21285/1814-3520-2019-3-628-639

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Редкоземельные металлы (РЗМ) образуют с магнием интерметаллические соединения (ИМС), которые повышают жаропрочность и механические свойства, а также позволяют снизить окисляемость магниевых сплавов в жидком и твердом состояниях. Высокая жаропрочность сплавов с редкоземельными металлами (РЗМ) объясняется высокой дисперсностью продуктов распада при старении [1–9].

Согласно теоретическим положениям, разработанным А.А. Бочваром, высокую жаропрочность магниевых сплавов, содержащих РЗМ, обеспечивают:

1) создание сложнолегированного термически стабильного твердого раствора, а именно – введение трехвалентных РЗМ приводит к повышению сил межатомной связи в магнии;

2) создание гетерогенной дисперсной структуры в процессе старения за счет выделения фазы  $Mg_2RZM$ ;

3) повышение термической стабильности и температуры коагуляции упрочняющих фаз;

4) укрепление границ зерен, что достигается образованием тонкого каркаса частиц фаз, блокирующих границы зерен.

Анализ патентной активности позволяет сформировать общее понимание о тенденциях развития направления (магниевые сплавы с РЗМ) в России. В связи с этим были проанализированы патенты Российской Федерации, полученные в 1999–2019 годах, защищающие составы магниевых сплавов с РЗМ, а также способы их получения. Поиск проведен через информационно-поисковую систему «Интернет» портала Федерального института промышленной собственности в базе данных изобретений. Анализ динамики позволяет сделать вывод о том, что с 2008 г. наблюдается наращивание темпов развития направления, что говорит о проработанности его технологической базы, обеспечивающей возможность постоянного улучшения существующих магниевых сплавов с РЗМ (рис. 1).

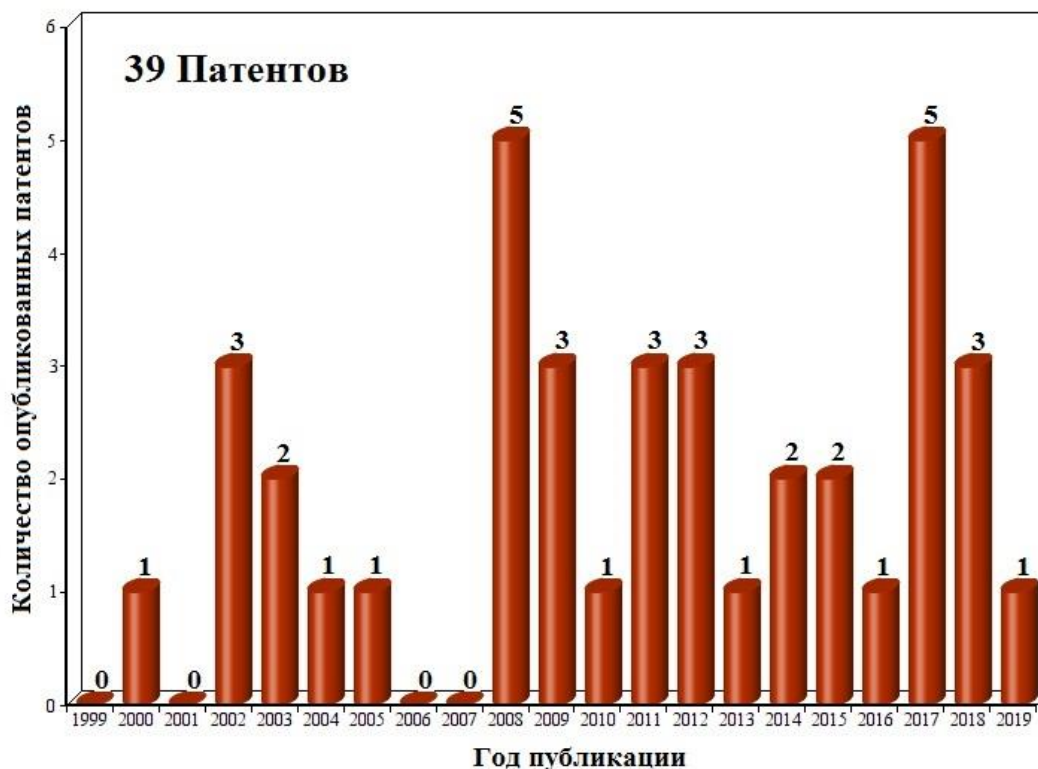


Рис. 1. Динамика патентной активности по годам  
Fig. 1. Dynamics of patent activity by years



В диапазоне с 2008 по 2019 год заявителями было в среднем получено 2 патента ежегодно на новые составы сплавов на основе магния с РЗМ. Спад в 2019 г. может быть обусловлен тем, что в настоящее время опубликованы не все патенты, заявки на которые поданы заявителями в интервале с 2017 по 2019 год.

Анализ правовых статусов опубликованных патентов позволяет понять, насколько высока важность полученных патентов для заявителей (рис. 2).

На основании распределения патентов по правовым статусам можно отметить высокий процент действующих патентов (84%), что говорит о высокой важности полученных патентов для правообладателей и желании поддерживать правовую охрану своих разработок.

Абсолютным лидером в патентовании технических решений среди предприятий, университетов и научно-исследовательских организаций выступает Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов в г. Москва, который имеет 10 патентов. Стоит подчеркнуть, что основными легирующими элементами из группы РЗМ в рассмотренных патентах (патентообладатели: Всероссийский научно-исследовательский институт авиа-

ционных материалов, Институт металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова, «Magnesium Elektron Limited», Ю.А. Щепочкина) являются неодим, гадолиний и иттрий.

Известно, что сплавы с РЗМ на основе магния и алюминия производят при введении лигатур, необходимость применения которых обусловлена повышением степени усвоения легкоокисляющихся легирующих элементов, а также малой скоростью растворения тугоплавких компонентов в чистом виде в расплаве. Учитывая характер распределения компонента в лигатурных материалах и скорость растворения его в расплавах магния и алюминия, можно получить заданное содержание легирующего компонента в сплаве добавлением в твердую шихту или непосредственно в расплав определенного количества лигатуры [10–17]. Одним из важных факторов, влияющих на процесс растворения лигатуры, является ее фазовый состав и морфология ИМС. От фазового состава лигатуры зависит ряд ее характеристик: технологичность, температура плавления и др.

Целью настоящего исследования является изучение процесса получения двойных лигатур Mg-Nd, Mg-Gd при металлотермическом восстановлении РЗМ из фторидно-хлоридных расплавов.

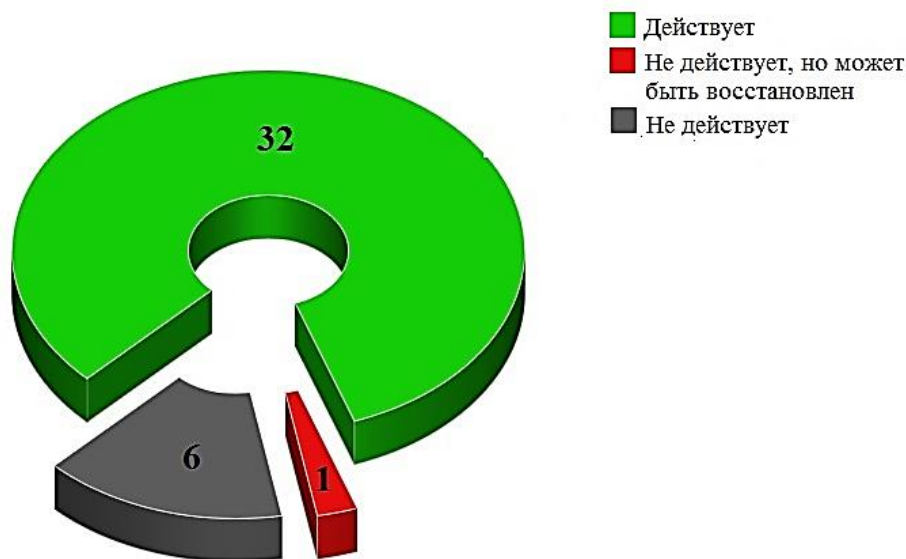


Рис. 2. Правовые статусы опубликованных патентов  
Fig. 2. Legal statuses of published patents

## 2. ОБОРУДОВАНИЕ, МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследование и выбор технологических параметров плавов осуществляли на основании проведенных поисковых опытов и анализа научно-технической информации в области основных технологических параметров получения магниевых лигатур.

Комплексный термический анализ проводился на установке STA 429 CD немецкой фирмы «NETZSCH» в алуновом тиглях с крышками (в потоке аргона при скоростях нагрева и охлаждения  $10^{\circ}\text{C}$  в мин). При этом одновременно получали кривые изменения массы – ТГ (единица измерения в пер. с англ. «TG») в «%» от исходной навески и изменения кривых дифференциально-термического анализа (ДТА) в «мкВ/мг».

В качестве лабораторного оборудования была использована шахтная электропечь с карбидокремниевыми нагревателями. Для увеличения скорости протекания полной обменной реакции расплавленных солей с магнием все плавки проводились при перемешивании расплава при помощи стального импеллера.

Элементный анализ образцов полученных лигатур проводили при помощи последовательного рентгенофлуоресцентного спектрометра XRF-1800 японской фирмы «Shimadzu». Идентификация фаз производилась с применением рентгеновского порошкового дифрактометра XRD-6000 фирмы «Shimadzu», снабженного высокотемпературной камерой HA1001 ( $\text{CuK}\alpha$ -излучение, диапазон углов  $2\theta = 10\text{--}80^{\circ}$ , скорость съемки  $2^{\circ}/\text{мин}$ ). Металлографическое исследование образцов полученных лигатур выполняли на электронном микроскопе VEGA («TESCAN», Чехия) с энергодисперсионным спектрометром INCAx-act («Oxford», Англия).

Все опыты проводились с чушковым магнием марки Мг 90, квалификация исходных солей: KCl, NaCl,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$  «х.ч.»,  $\text{NdF}_3$  и  $\text{GdF}_3$  марки «ч» (ТУ 6-09-4677-83). Плавки проводились по следующей ме-

тодике. Предварительно подготавливали технологическую солевую смесь, состоящую из  $35\text{KCl}+35\text{NaCl}+30\text{CaCl}_2$  и  $\text{NdF}_3$  или  $\text{GdF}_3$ . Кроме того, к солевой основе добавлялся  $\text{MgCl}_2$  не более 5% от массы фторида РЗМ и  $\text{CaF}_2$  (повышающий вязкость флюса и предотвращающий грануляцию полученной лигатуры компонент). Затем смесь тщательно перемешивалась, после чего данную солевую смесь совместно с магнием помещали в стальной тигель, который устанавливался в печь, выдерживали при заданной температуре в течение определенного времени при непрерывном перемешивании, после окончания восстановительной реакции расплав отстаивался заданное время, и происходило расслоение продуктов реакции: верхний слой – расплав солей; нижний – лигатура Mg-РЗМ. Далее поверхностный расплав солей сливали в шлаковую изложницу, а полученную лигатуру разливали в чушки. Технологичность процесса определялась следующими параметрами: процентным извлечением (выходом) РЗМ в лигатуру, ее жидкотекучестью, равномерным распределением РЗМ в полученных чушках и санитарными условиями труда.

## 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для выявления закономерностей магниетермического восстановления неодама и гадолиния из фторидно-хлоридных расплавов были проведены термические исследования взаимодействия солевых смесей с магнием. На рис. 3 для сравнения показаны две термограммы, полученные при первом нагреве солевой смеси  $\text{KCl-NaCl-CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-CaF}_2\text{-NdF}_3$  без магния (I) и в присутствии магния (II), а на рис. 4 – две термограммы, полученные при их первом охлаждении.

При плавлении солевой смеси с магнием зафиксирован эндотермический эффект с максимумом при  $549^{\circ}\text{C}$ , соответствующий плавлению фторида неодама в присутствии хлоридов, после которого зафиксирован замедленный экзотермический эффект с минимумом при  $605^{\circ}\text{C}$  (отсутствующий при нагреве солевой смеси без магния),



по всей видимости, соответствующий процессу восстановления неодима из фторидно-хлоридного расплава. Зафиксированный пик восстановления перекрывается пиком плавления магния в расплаве солей, дающий эндотермический эффект с максимумом при 666,1°C. При 706°C заканчива-

ются все превращения в исследуемой системе. При охлаждении солевой смеси с магнием на кривых четко наблюдается два тепловых экзотермических эффекта кристаллизации с минимумами при 508,4°C и 625,4°C, соответствующие кристаллизации солевой смеси и лигатуры Mg-Nd.

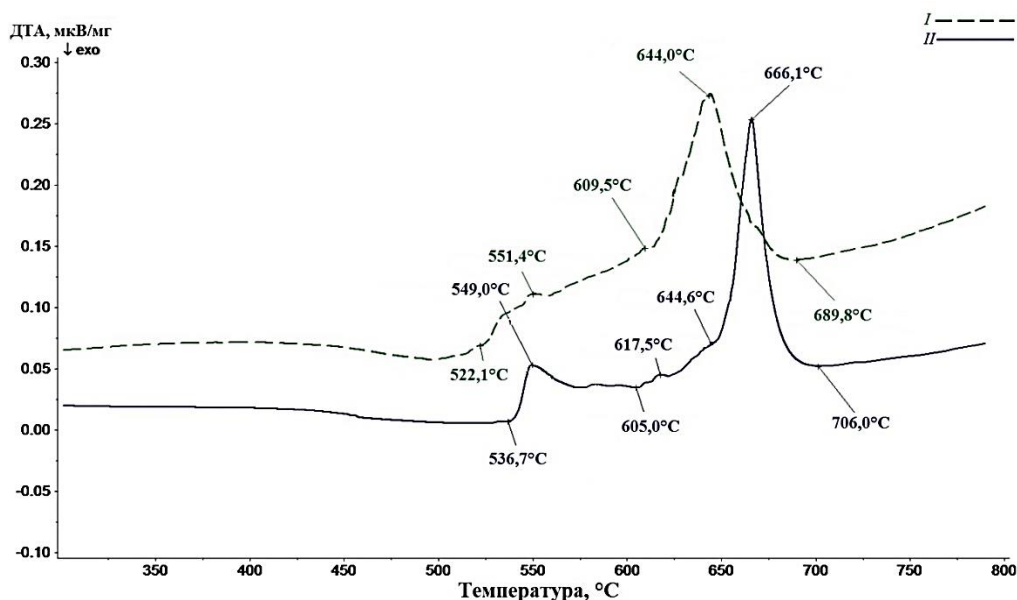


Рис. 3. Кривые дифференциально-термического анализа и температуры плавления солевой смеси без магния (I) и в присутствии магния (II) при нагревании до 800°C  
Fig. 3. Curves of the differential thermal analysis and melting temperature of magnesium (I)-free salt mixture and mixture in the presence of magnesium (II) when heated up to 800°C

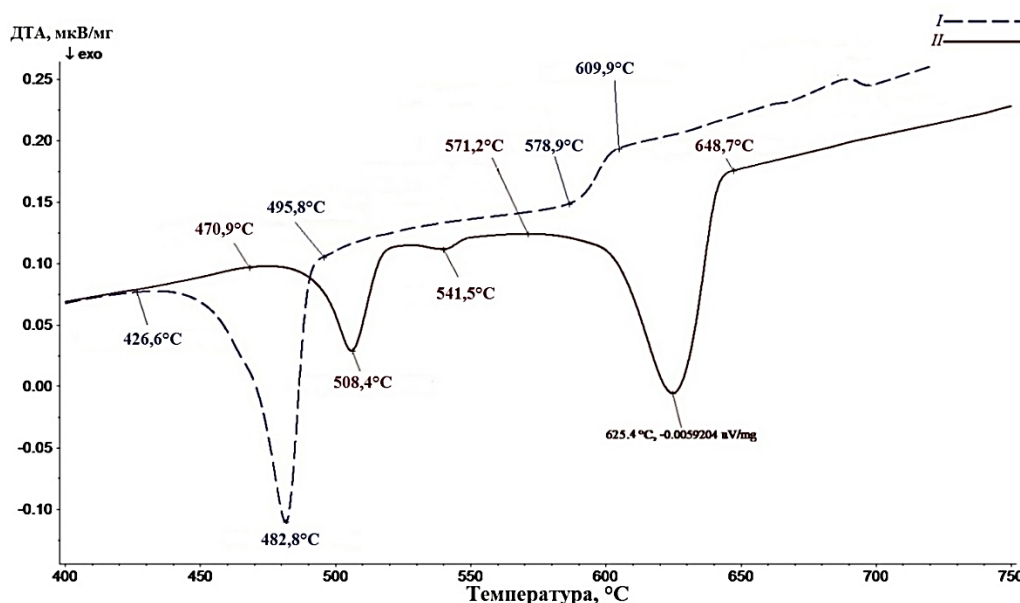


Рис. 4. Кривые дифференциально-термического анализа и температуры охлаждения солевой смеси без магния (I) и в присутствии магния (II) при нагревании до 800°C  
Fig. 4. Curves of the differential thermal analysis and cooling temperature of the magnesium (I)-free salt mixture and mixture in the presence of magnesium (II) when heated up to 800°C

Элементный анализ полученного после термических исследований слитка лигатуры показал наличие в нем 19,16% масс. неодима.

На рис. 5 для сравнения показаны две

термограммы, полученные при первом нагреве солевой смеси  $KCl-NaCl-CaCl_2-MgCl_2-CaF_2-GdF_3$  без магния (I) и в присутствии магния (II), а на рис. 6 – две термограммы, полученные при их первом охлаждении.

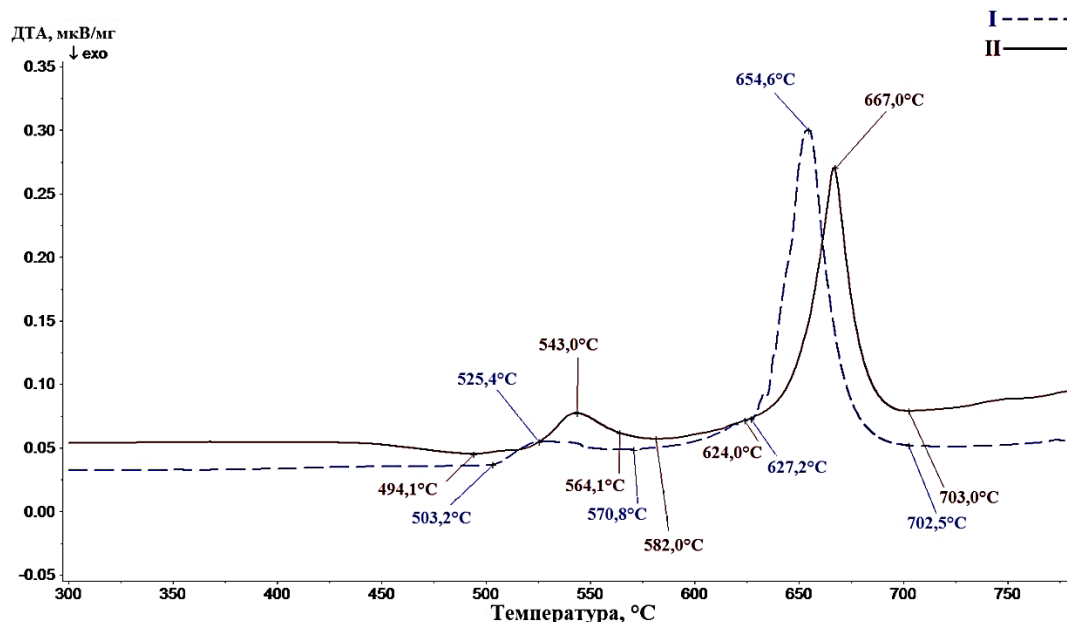


Рис. 5. Кривые дифференциально-термического анализа и температуры плавления солевой смеси без магния (I) и в присутствии магния (II) при нагревании до 800°C

Fig. 5. Curves of the differential thermal analysis and melting temperature of the magnesium (I)-free salt mixture and mixture in the presence of magnesium (II) when heated up to 800°C

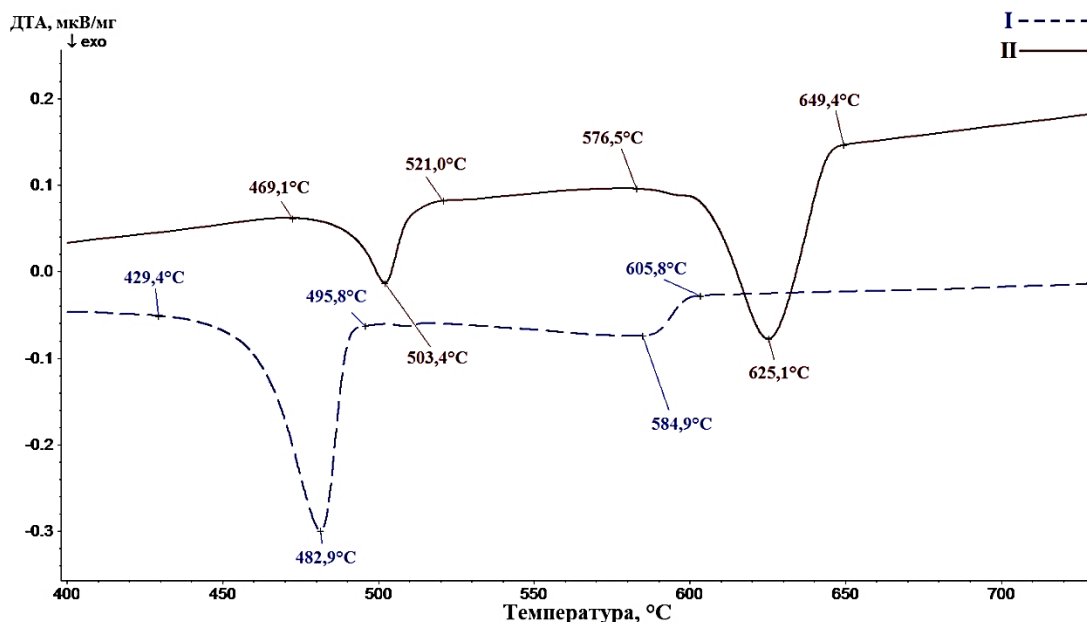


Рис. 6. Кривые дифференциально-термического анализа и температуры плавления солевой смеси без магния (I) и в присутствии магния (II) при нагревании до 800°C

Fig. 6. Curves of the differential thermal analysis and melting temperature of the magnesium (I)-free salt mixture and mixture in the presence of magnesium (II) when heated up to 800°C



При первом нагреве солевой смеси с магнием можно отметить первый максимум при  $543,0^{\circ}\text{C}$ , соответствующий плавлению солевой смеси, после которого можно зафиксировать замедленный экзотермический эффект в диапазоне температур  $564,1\text{--}624,0^{\circ}\text{C}$  (отсутствующий при нагреве солевой смеси без магния) с минимумом при  $582,0^{\circ}\text{C}$ , который, в свою очередь, перекрывается эндотермическим пиком плавления магния с максимумом при  $667,0^{\circ}\text{C}$ . Вероятнее всего, отмеченный экзотермический эффект свидетельствует о протекании металлотермического процесса восстановления гадолиния из фторидно-хлоридного расплава. При охлаждении также можно наблюдать разницу в значении тепловых эффектов.

Расхождения в температурах экзотермических и эндотермических эффектов свидетельствуют о протекании реакции восстановления неодима и гадолиния из фторидно-хлоридного расплава.

На втором этапе для изучения скорости металлотермической реакции на границе раздела фаз «расплав магния-расплав флюса» проводились эксперименты по варьированию времени процесса при температурах  $690$ ,  $730$ ,  $800^{\circ}\text{C}$ . Для этого готовились идентичные по составу флюсы. Необходимое количество приготовленных флюсов и магния засыпалось в тигли, которые

помещались в шахтную печь и выдерживались  $5$ ,  $10$ ,  $15$ ,  $20$ ,  $25$ ,  $30$ ,  $35$ ,  $40$ ,  $45$ ,  $50$  мин после проплавления. После выдержки в течение заданного интервала времени тигель с расплавом извлекался из печи, проводилось разделение лигатуры и отработанного флюса, а также литья лигатуры в стальную изложницу, после чего осуществлялось отмывание тонкого слоя флюса, оставшегося на лигатуре, и далее определялось содержание РЗМ в ней. При различной выдержке десяти тиглей с одинаковым составом шихты скорость восстановления оценивали по изменению содержания РЗМ в лигатуре (в ходе протекания реакции в каждом тигле относительно расчетного). По результатам экспериментов построены зависимости изменения выхода РЗМ (неодим и гадолиний) в лигатуру от времени выдержки (рис. 7).

Установлено, что процесс восстановления проходит достаточно быстро ( $20\text{--}30$  мин), причем достигается извлечение неодима и гадолиния до  $96\%$  при  $730^{\circ}\text{C}$ , а процесс восстановления фторидов неодима и гадолиния сопровождается образованием однородной лигатуры  $\text{Mg-Nd}$ ,  $\text{Mg-Gd}$ . С повышением температуры до  $800^{\circ}\text{C}$  выход по РЗМ снижается, кроме того, значительно увеличиваются безвозвратные потери магния (до  $20\%$ ), а также повышается газосодержание лигатурного сплава.

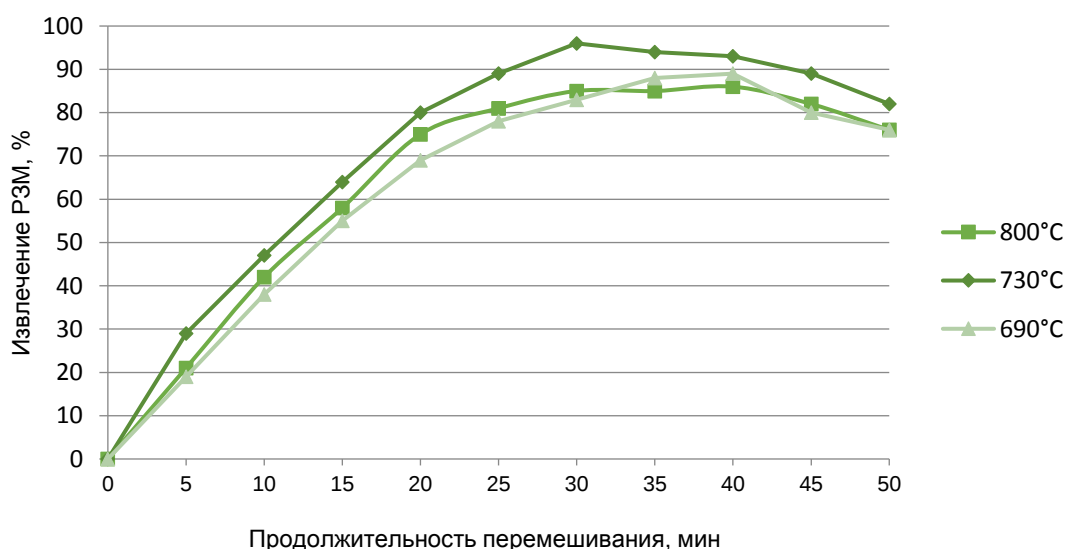


Рис. 7. Зависимость извлечения редкоземельных металлов от продолжительности перемешивания  
Fig. 7. Dependence of rare earth metal recovery on mixing duration

На следующем этапе были проведены плавки с учетом четырех факторов: в экспериментах регулировалась температура процесса, скорость вращения импеллера, время перемешивания, а также отношение «флюс: РЗМФ<sub>3</sub>». Каждой ячейке математического плана отвечают усредненные экспериментальные данные по результатам трех параллельных опытов. Исходные значения и результаты эксперимента по получению лигатуры магний-неодим, магний-гадолиний приведены в табл. 1.

Экспериментально доказано, что оптимальные пределы регулирования температуры на стадии получения магниевой лигатуры составляют 720–740°C, при данном температурном диапазоне затрачивается минимальное время (20–30 мин) на проведение реакции восстановления неодима и гадолиния. При отношении флюса к фториду РЗМ 4:1 создаются условия для получения лигатуры в виде слитка, при меньшем отношении полученная лигатура представлена гранулами.

В результате проведенных плавки были получены лигатуры с содержанием

РЗМ от 20 до 35% масс., причем необходимое содержание РЗМ в лигатуре достигалось корректировкой содержания фторидов РЗМ в технологической солевой смеси KCl-NaCl-CaCl<sub>2</sub>-MgCl<sub>2</sub>-CaF<sub>2</sub>. Предложенный способ получения лигатур магний-неодим, магний-гадолиний обеспечивает ее высокое качество. На рис. 8 представлены фотографии изломов чушек лигатуры Mg-35Nd плавки № 16 (см. рис. 8 а) и лигатуры Mg-30Gd плавки № 8 (см. рис. 8 б).

Полученные лигатуры отвечают требованиям, предъявляемым к магниевым лигатурам, макроструктура чушек чистая, однородная, плотная, при этом отсутствуют неметаллические, оксидные и газообразные включения.

Полученные лигатуры по химическому составу соответствуют требованиям ТУ 48-4-271-91 «Лигатура магний-неодим». Сравнительный анализ полученных лигатур с ТУ по содержанию основных компонентов и контролируемых примесей представлен в табл. 2 в лигатуре магний-гадолиний. Содержание основных контролируемых примесей также была сопоставлено с ТУ 48-4-271-91.

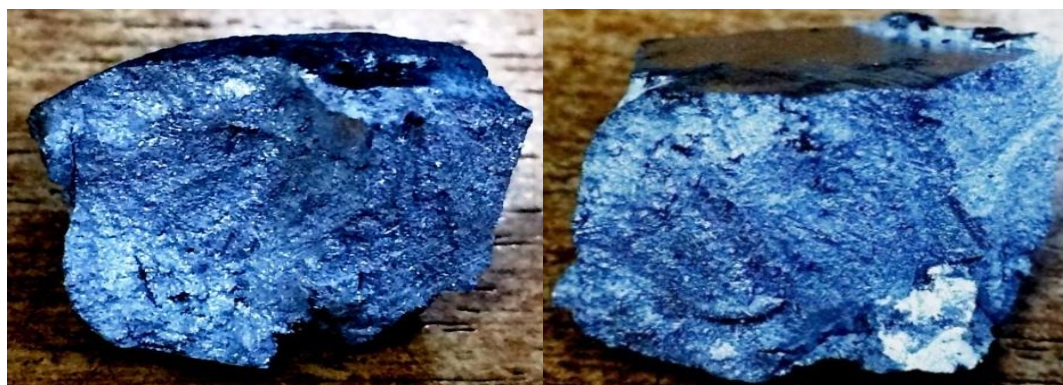
**Таблица 1**

**Результаты синтеза лигатуры Mg-РЗМ**

**Table 1**

**Results of Mg-REM master alloy synthesis**

| № опыта | Отношение флюс: РЗМФ <sub>3</sub> | T, °C | t, мин | Перемешивание, об/мин | Выход Nd, % | Выход Gd, % |
|---------|-----------------------------------|-------|--------|-----------------------|-------------|-------------|
| 1       | 2:1                               | 690   | 20     | 150                   | 66,2        | 60,4        |
| 2       | 4:1                               | 690   | 20     | 150                   | 89,8        | 87,2        |
| 3       | 2:1                               | 740   | 20     | 300                   | 67,4        | 66,9        |
| 4       | 4:1                               | 740   | 20     | 300                   | 95,1        | 96,1        |
| 5       | 2:1                               | 690   | 30     | 300                   | 68,4        | 60,2        |
| 6       | 4:1                               | 690   | 30     | 300                   | 96,9        | 96,4        |
| 7       | 2:1                               | 740   | 30     | 150                   | 69,2        | 63,4        |
| 8       | 4:1                               | 740   | 30     | 150                   | 97,2        | 96,0        |
| 9       | 2:1                               | 690   | 20     | 300                   | 64,2        | 61,7        |
| 10      | 4:1                               | 690   | 20     | 300                   | 95,4        | 96,1        |
| 11      | 2:1                               | 740   | 20     | 300                   | 65,6        | 61,1        |
| 12      | 4:1                               | 740   | 20     | 300                   | 96,2        | 96,8        |
| 13      | 2:1                               | 690   | 30     | 150                   | 62,1        | 52,3        |
| 14      | 4:1                               | 690   | 30     | 150                   | 88,2        | 88,0        |
| 15      | 2:1                               | 740   | 30     | 300                   | 71,2        | 66,2        |
| 16      | 4:1                               | 740   | 30     | 300                   | 97,4        | 97,0        |



a

b

Рис. 8. Лигатуры: а – Mg-35Nd; б – Mg-30Gd  
Fig. 8. Master alloys: a – Mg-35Nd; b – Mg-30Gd

Таблица 2

Химический состав полученных лигатур

Table 2

Chemical composition of obtained master alloys

| № опыта        | Норма               |       |                                  |      |      |      |      |      |
|----------------|---------------------|-------|----------------------------------|------|------|------|------|------|
|                | Массовая доля, %    |       |                                  |      |      |      |      |      |
|                | Основные компоненты |       | Контролируемые примеси, не более |      |      |      |      |      |
|                | Mg                  | Nd    | La+Ce+Pr                         | Fe   | Cu   | Ni   | Si   | Al   |
| Эталон         | основа              | 20–35 | 2                                | 0,15 | 0,1  | 0,01 | 0,05 | 0,05 |
| Mg-Nd,<br>№ 8  | основа              | 34,79 | 0,07                             | 0,05 | 0,01 | –    | 0,04 | 0,03 |
| Mg-Nd,<br>№ 16 | основа              | 34,22 | 0,12                             | 0,07 | 0,03 | –    | 0,03 | 0,04 |
| Mg-Gd,<br>№ 8  | основа              | 30,11 | 0,23                             | 0,06 | 0,06 | –    | 0,04 | 0,02 |
| Mg-Gd,<br>№ 16 | основа              | 29,89 | 0,34                             | 0,08 | 0,04 | –    | 0,04 | 0,03 |

Микроструктурный анализ полученных лигатур показал, что основой магниевой лигатуры являются упрочненные кристаллы магниевое твердого раствора, по границам которых располагается эвтектическая смесь сравнительно мягких кристаллов того же твердого раствора и кристаллов твердых ИМС. Лигатура магний-неодим представляет собой дендриты твердого раствора  $\alpha$ -Mg, окруженные ИМС состава  $Mg_{12}Nd$ . На рис. 8 представлены электронные изображения микроструктуры лигатуры Mg-Nd с содержанием неодима 35% масс. Микрорент-

геноспектральный анализ участков структуры показал, что интерметаллические соединения (светлые участки), содержат 31,6% масс. (7,22 ат.%) неодима, что соответствует фазе  $Mg_{12}Nd$ .

Микроструктура магниевых лигатур с гадолинием представлена большим количеством равноосных дендритов, присутствующих в магниевой матрице. Микрорентгеноспектральный анализ участков структуры показывает, что индивидуальные ИМС (светлые участки) содержат около 36% мас. гадолиния.

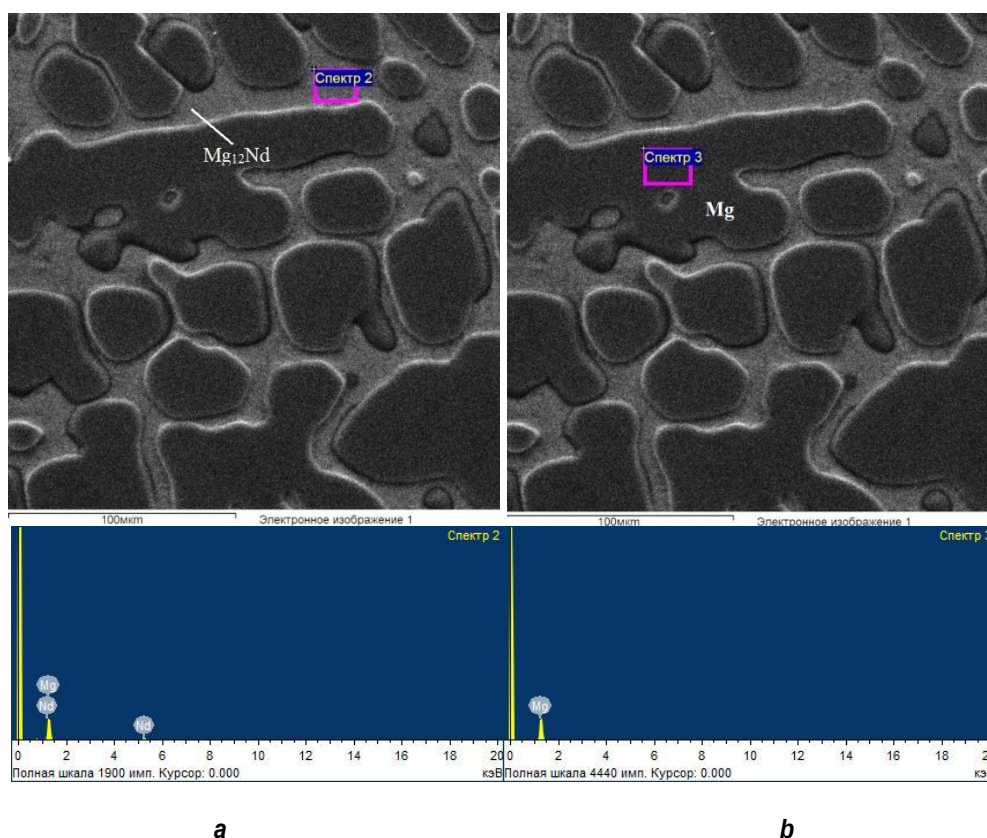


Рис. 8. Электронные изображения микроструктуры лигатуры Mg-35Nd: а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 1000$   
Fig. 8. Electronic images of Mg-35Nd master alloy microstructure: a –  $\times 1000$ ; b –  $\times 1000$

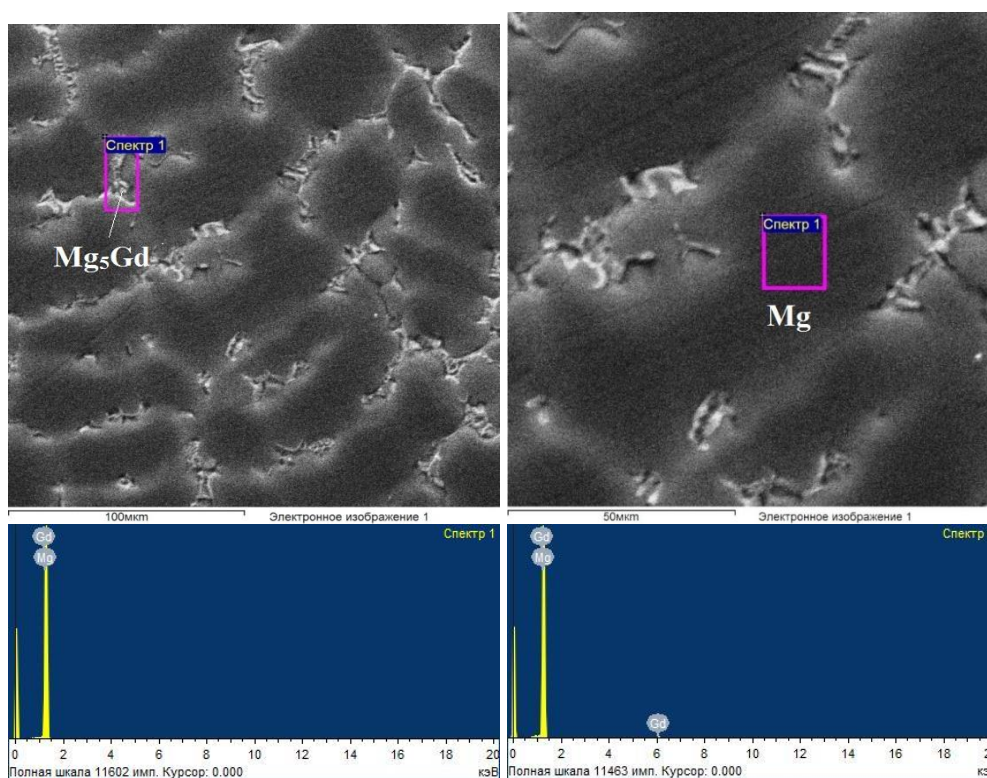


Рис. 9. Электронные изображения микроструктуры лигатуры Mg-35Nd: а –  $\times 1000$ ; б –  $\times 1000$   
Fig. 9. Electronic images of Mg-35Nd master alloy microstructure: a –  $\times 1000$ ; b –  $\times 1000$



#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате дифференциально-термического анализа определены интервалы температур тепловых эффектов при плавлении (начало плавления  $520,4^{\circ}\text{C}$ ) компонентов солевой смеси  $\text{KCl-NaCl-CaCl}_2\text{-MgCl}_2\text{-CaF}_2\text{-NdF}_3(\text{GdF}_3)$ , а также при проведении процесса магнийтермического восстановления РЗМ из солевой смеси. Установлены экзотермические эффекты восстановления в диапазоне температур  $582\text{--}623,7^{\circ}\text{C}$ .

Разработан способ получения лигатуры магний-неодим и магний-гадолиний магнийтермическим восстановлением РЗМ из хлоридно-фторидного расплава при использовании в качестве технологической со-

левой смеси следующих солей:  $\text{KCl}$ ,  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{CaF}_2$ . Установлено, что при температуре на стадии синтеза магниевой лигатуры от  $720$  до  $740^{\circ}\text{C}$  затрачивается минимальное время ( $20\text{--}30$  мин) на проведение реакции восстановления неодима и гадолиния. При выдерживании необходимых технологических параметров обеспечивается стабильный выход неодима и гадолиния в лигатуру от  $96$  до  $97,4\%$ .

Анализ микроструктуры показал, что строение образцов полученной лигатуры магний-неодим, магний-гадолиний представляет собой дендриты твердого раствора  $\alpha\text{-Mg}$ , по границам которых располагаются интерметаллические соединения типа  $\text{Mg}_x\text{PZM}_y$ .

#### Библиографический список

1. Савицкий Е.М., Терехова В.Ф. *Металловедение редкоземельных металлов*. М.: Наука, 1975. 272 с.
2. Рохлин Л.Л. Исследования магниевых и алюминиевых сплавов, содержащих редкоземельные металлы, в Институте металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова РАН // *Цветные металлы*. 2011. № 5. С. 74–77.
3. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Лукьянова Е.А., Тарытина И.Е., Добаткин С.В. Исследования для разработки новых конструкционных магниевых сплавов с редкоземельными металлами // *Технология легких сплавов*. 2018. № 4. С. 44–53.
4. Волкова Е.Ф., Рохлин Л.Л., Бецофен С.Я., Акинина М.В. Исследование влияния РЗЭ иттриевой и цериевой подгрупп на свойства магниевых сплавов // *Технология легких сплавов*. 2014. № 2. С. 42–48.
5. Рохлин Л.Л., Добаткина Т.В., Никитина Н.И., Тарытина И.Е. Исследование свойств высокопрочного магниевого сплава системы  $\text{Mg-Y-Gd-Zr}$  // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2010. № 12. С. 15–18.
6. Волкова Е.Ф., Акинина М.В., Мостяев И.В. Пути повышения основных механических характеристик магниевых деформируемых сплавов // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10 (58). С. 2–12.
7. Дуюнова В.А., Гончаренко Е.С., Мухина И.Ю., Уридия З.П., Волкова Е.Ф. Научное наследие академика И.Н. Фридляндера. Современные исследования магниевых и литейных алюминиевых сплавов // *Цветные металлы*. 2013. № 9. С. 71–78.
8. Wei Guobing, Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Weidong, Wei Qunyi. Structure Heredity Effect of  $\text{Mg-10Y}$  Master Alloy in AZ31 Magnesium Alloy // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2013. Vol. 42. Issue 10. P. 2009–2013.
9. Кавалла Р., Бажин В.Ю. Изотропность свойств листовых заготовок из магниевых сплавов // *Записки Горного института*. 2016. Т. 222. С. 828–832.
10. Белкин Г.И. Производство магний-циркониевых лигатур и сплавов. М.: Металлургиздат, 2001. 146 с.
11. Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Sunyun, Wei Guobin, Yang Yan. Effects of Different State  $\text{Mg-5Sr-10Y}$  Master Alloys on the Microstructure Refinement of AZ31 Magnesium Alloy // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2013. Vol. 42. Issue 12. P. 2421–2426.
12. Косов Я.И., Бажин В.Ю. Синтез лигатуры алюминий-эрий из хлоридно-фторидных расплавов // *Расплавы*. 2018. № 1. С. 14–28.
13. Савченков С.А., Бажин В.Ю. Синтез магниевых лигатур во фторидно-хлоридных расплавах // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2018. Т. 22. № 5. С. 214–224.
14. Скачков В.М., Яценко С.П. Получение Sc-, Zr-, Hf-, Y-лигатур на основе алюминия методом высокотемпературных обменных реакций в расплавах солей // *Цветные металлы*. 2014. № 3. С. 22–26.
15. Савченков С.А., Уголков В.Л. Получение лигатур магний-цинк-редкоземельный металл в расплаве солей // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2019. Т. 23. № 1. С. 187–196.
16. Попова Э.А., Котенков П.В. Влияние состава лигатуры  $\text{Al-Zr-Y}$  на эффект модифицирования сплава  $\text{Al-4\% Cu}$  // *Расплавы*. 2016. № 2. С. 185–192.
17. Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Preparation of novel Al Er master alloys in chloride-fluoride melt // *Materials Science Forum*. 2018. Vol. 918. P. 21–27.

#### References

1. Savickij E.M., Terekhova V.F. *Metallvedenie redkozemel'nyh metallov* [Metal Science of rare earth metals]. Moscow: Nauka Publ., 1975, 272 p. (In Russ.).
2. Rohlin L.L. Researches of magnesium and aluminium alloys, contained rare-earth metals at the Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science of the Russian

Academy of Sciences. *Cvetnye metally* [Nonferrous Metals], 2011, no. 5, pp. 74–77. (In Russ.).

3. Rohlin L.L., Dobatkina T.V., Luk'yanova E.A., Tarytina I.E., Dobatkin S.V. Researches for development of new structural magnesium alloys with rare earth metals. *Tekhnologiya legkih splavov* [Technology of Light Alloys], 2018, no. 4, pp. 44–53. (In Russ.).

4. Volkova E.F., Rohlin L.L., Becofen S.Ya., Akinina M.V. Investigation of the effect of RE yttrium and cerium subgroup elements on magnesium base alloy properties. *Tekhnologiya legkih splavov* [Technology of Light Alloys], 2014, no. 2, pp. 42–48. (In Russ.).

5. Rohlin L.L., Dobatkina T.V., Nikitina N.I., Tarytina I.E. Studying properties of high-strength magnesium alloy of Mg-Y-Gd-Zr system. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov* [Metal Science and Heat treatment], 2010, no. 12, pp. 15–18. (In Russ.).

6. Volkova E.F., Akinina M.V., Mostyaev I.V. Ways to improve the basic mechanical properties of magnesium wrought alloys. *Trudy Vserossiyskogo nauchno-issledovatel'skogo instituta* [Proceedings of VIAM], 2017, no. 10 (58), pp. 2–12. (In Russ.).

7. Dyunova V.A., Goncharenko E.S., Muhina I.Yu., Uridiya Z.P., Volkova E.F. Science heritage of Academician I. N. Fridlyander. Modern investigations of magnesium and casting aluminium alloys in all-Russian scientific research institute of aviation materials "VIAM". *Cvetnye metally* [Nonferrous Metals], 2013, no. 9 pp. 71–78. (In Russ.).

8. Wei Guobing, Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Weidong, Wei Qunyi. Structure Heredity Effect of Mg-10Y Master Alloy in AZ31 Magnesium Alloy. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2013, vol. 42, issue 10, pp. 2009–2013.

9. Kavalla R., Bazhin V.Yu. Isotropic properties of sheet blanks of magnesium alloys. *Zapiski Gornogo instituta*

[Journal of Mining Institute], 2016, vol. 222, pp. 828–832. (In Russ.).

10. Belkin G.I. *Proizvodstvo magnij-cirkonievyyh ligatur i splavov* [Production of magnesium-zirconium master alloys and alloys]. Moscow: Metallurgizdat Publ., 2001, 146 p. (In Russ.).

11. Peng Xiaodong, Li Junchen, Xie Sunyun, Wei Guobin, Yang Yan. Effects of different state Mg-5Sr-10Y master alloys on the microstructure refinement of AZ31 magnesium alloy. *rare metal materials and engineering*, 2013, vol. 42, issue 12, pp. 2421–2426.

12. Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Synthesis of aluminium-erbium master alloy from chloride-fluoride melts. *Rasplavy* [Melts], 2018, no. 1, pp. 14–28. (In Russ.).

13. Savchenkov S.A., Bazhin V.Yu. Synthesis of magnesium master alloys in fluoride-chloride melts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2018, vol. 22, no. 5, pp. 214–224. (In Russ.).

14. Skachkov V.M., Yacenko S.P. Preparation of Sc-, Zr-, Hf-, Y-master alloys by the method of high-temperature exchange reactions in molten salts. *Cvetnye metally* [Nonferrous Metals], 2014, no. 3, pp. 22–26. (In Russ.).

15. Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. Mg-Zn-REM master alloy production in molten salts. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2019, vol. 23, no. 1, pp. 187–196. (In Russ.).

16. Popova E.A., Kotenkov P.V. Influence of Al-Zr-Y master alloy composition on modification effect of Al-4% Cu alloy. *Rasplavy* [Melts], 2016, no. 2, pp. 185–192. (In Russ.).

17. Kosov Ya.I., Bazhin V.Yu. Preparation of novel Al Er master alloys in chloride-fluoride melt. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 918, pp. 21–27.

#### Критерии авторства

Савченков С.А., Уголков В.Л. заявляют о равном участии в получении и оформлении научных результатов и в равной мере несут ответственность за плагиат.

#### Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Савченков Сергей Анатольевич**,  
аспирант,  
Санкт-Петербургский горный университет,  
199106, г. Санкт-Петербург, Васильевский о-в,  
21 линия, 2, Россия,  
e-mail: savchenkov.tlc@bk.ru

**Уголков Валерий Леонидович**,  
кандидат технических наук,  
старший научный сотрудник,  
Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова,  
199034, г. Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия,  
e-mail: ugolkov.52@mail.ru

#### Authorship criteria

Savchenkov S.A., Ugolkov V.L. declare equal participation in obtaining and formalization of scientific results and bear equal responsibility for plagiarism.

#### Conflict of interests

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

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey A. Savchenkov**,  
Postgraduate,  
St. Petersburg Mining University,  
21 Line, 2, Vasilievsky Ostrov, St. Petersburg 199106,  
Russia,  
e-mail: savchenkov.tlc@bk.ru

**Valery L. Ugolkov**,  
Cand. Sci. (Eng.),  
Senior Researcher,  
I. V. Grebenshchikov Institute of Silicate Chemistry,  
2 Naberezhnaya Makarova, St. Petersburg 199034, Russia,  
e-mail: ugolkov.52@mail.ru

Уважаемые коллеги!

**Мы приглашаем Вас к участию в нашем журнале в качестве авторов, рекламодателей и читателей и сообщаем требования к статьям, принимаемым к публикации**

I. Статья представляется **в электронном и распечатанном видах**. Рекомендуемый объем статьи не менее 10 000 знаков.

К статье прилагаются:

1. Экспертное заключение.
2. Название рубрики, в которой должна быть размещена Ваша статья; УДК; название статьи; реферат (аннотация), количество слов в реферате – не менее 200; ключевые слова (4-5); сведения об авторах: название учреждения, его адрес; фамилия, имя, отчество (полностью); ученая степень; звание и должность; контактный телефон и e-mail (**вся информация предоставляется одним файлом**).
3. Статья должна иметь личную подпись автора; на статьях адъюнктов и аспирантов должна стоять также подпись научного руководителя.

II. **Текст статьи, сведения об авторах, реферат, ключевые слова, адрес учреждения, контактный телефон и E-mail** должны быть также представлены по электронной почте: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu) **в виде файла с расширением \*.DOC** – документа, построенного средствами Microsoft Word 97 или последующих версий.

При наборе статьи в Microsoft Word рекомендуются следующие установки:

- 1) параметры **страницы** и абзаца: отступы сверху и снизу – **2 см**; слева и справа – **2 см**; **табуляция – 2 см**; ориентация – книжная;
- 2) шрифт – **Times New Roman**, размер – **12**, межстрочный интервал – одинарный, перенос слов – автоматический;
- 3) при вставке формул использовать **Microsoft Equation 3** при установках: элементы формулы выполняются **курсивом**; для греческих букв и символов назначать шрифт **Symbol**, для остальных элементов – **Times New Roman**. Размер символов: обычный – 12 пт, крупный индекс – 7 пт, мелкий индекс – 5 пт, крупный символ – 18 пт, мелкий символ – 12 пт. Все экспликации элементов формул необходимо также выполнять в виде формул;
- 4) **рисунки**, вставленные в текст, должны быть выполнены с разрешением 300 dpi, B&W – для черно-белых иллюстраций, Grayscale – для полутонов, максимальный размер рисунка с надписью: ширина 150 мм, высота 245 мм и представлены в виде файла с расширением \*.BMP, \*.TIFF, \*.JPG, должны допускать перемещение в тексте и возможность изменения размеров. **Схемы, графики** выполняются во встроенной программе **MS Word** или в **MS Excel**, с **приложением файлов (представляемые иллюстрации должны быть четкими и ясными во всех элементах)**;
- 5) библиографические ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ Р 7.05 2008.

**Внимание! Публикация статьи является бесплатной.**

Стоимость журнала – 500 руб. (без стоимости почтовых расходов).

«Вестник ИрГТУ» включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук, в DOAJ, международный каталог периодических изданий «UlrichsPeriodicals Directory», EBSCO, в Научную электронную библиотеку (eLIBRARY.RU), представлен в Научной электронной библиотеке «КиберЛенинка» (CYBERLENINKA), рассылается в Российскую книжную палату, ВИНТИ РАН.

**Статьи, опубликованные в журнале «Вестник ИрГТУ», реферируются и рецензируются.**

**Редакция оставляет за собой право отклонять статьи, не отвечающие указанным требованиям.**

По вопросам публикации статей обращаться: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», Д-215.

Телефон: **(3952) 40-57-56** – Привалова Галина Петровна, ответственный за выпуск.

Факс: **(3952) 405-100**, e-mail: [pgp@istu.edu](mailto:pgp@istu.edu)

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

# ВЕСТНИК

Иркутского Государственного Технического Университета

Научный журнал  
№ 3 (146) 2019

12+

Редактор Я.В. Макшанцева  
Художественный редактор Е.В. Хохрин  
Ответственный за выпуск Г.П. Привалова  
Перевод на английский язык В.В. Батицкой  
Верстка Н.П. Дзюндзя

Выход в свет 28.06.2019 г. Формат 60х90/8.  
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ. л. 26,5.  
Тираж 500 экз. Заказ 166. Поз. плана 3н.

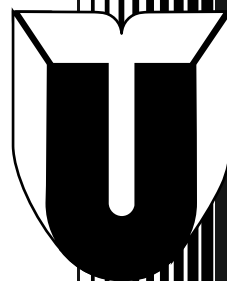
Издание распространяется **бесплатно**

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

Отпечатано в типографии Издательства  
ФГБОУ ВО "Иркутский национальный  
исследовательский технический университет"

664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83

ИЗДАТЕЛЬСТВО



Издательство Иркутского национального исследовательского технического университета, 2019

