

# ВЕСЦІ

## НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

---

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2020. Т. 65, №4

---

# ИЗВЕСТИЯ

## НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2020. Т. 65, №4

---

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР. Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук», с 1998 г. – современное название

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации №391 от 18 мая 2009 г.

*Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь для опубликования результатов диссертационных исследований, включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)*

Г л а в н ы й   р е д а к т о р

**Сергей Антонович Чижик –**

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Р е д а к ц и о н н а я   к о л л е г и я

**А. П. Ласковнёв** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь (*заместитель главного редактора*)

**И. А. Старостина** (*ведущий редактор журнала*)

**А. В. Белый** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

**П. А. Витязь** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**А. Я. Григорьев** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь

**В. Г. Залесский** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

**А. Ф. Ильющенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Беларусь  
**С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. П. Крень** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. М. Малярович** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь  
**Н. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь  
**О. Г. Пенязков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь  
**М. Л. Хейфец** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

**С. Воденичаров** – Болгарская академия наук, София, Болгария  
**Ю. Гавлик** – Институт технологии машиностроения и автоматизации производства Краковской политехники (Технологический университет), Краков, Польша  
**Г. Жинтялис** – Литовская академия наук, Вильнюс, Литва  
**Б. Каталинич** – Международная инженерная академия, Технический университет Вены, Вена, Австрия  
**А. А. Михалевич** – Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь  
**А. Г. Наумовец** – Национальная академия наук Украины, Киев, Украина  
**К. А. Солнцев** – Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова, Москва, Россия  
**Л. Танович** – Белградский университет, Белград, Сербия  
**Б. М. Хрусталёв** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь

*Адрес редакции:  
ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.  
Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru  
vestift.belnauka.by*

---

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2020. Т. 65, №4

*Выходит на русском, белорусском и английском языках*

---

Редактор *И. А. Старостина*  
Компьютерная верстка *А. В. Новик*

Подписано в печать 22.12.2020. Выход в свет 29.12.2020. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 70 экз. Заказ 218.  
Цена номера: индивидуальная подписка – 12,32 руб., ведомственная подписка – 29,31 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий №1/18 от 02.08.2013. ЛП №02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск, Республика Беларусь

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,  
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2020

# PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2020, vol. 65, no. 4

---

The Journal was founded in 1956 under the titles  
“Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series”,  
since 1992 – “Proceedings of the Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series”,  
since 1998 – it comes under its actual title

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

The Journal was registered on May 18, 2009 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus  
in the State Registry of Mass Media, reg. no. 391

*The Journal is included in The List of Journals for Publication of the Results  
of Dissertation Research in the Republic of Belarus and in the database  
of Russian Science Citation Index (RSCI)*

## E d i t o r - i n - C h i e f

**Sergei A. Chizhik** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

## E d i t o r i a l B o a r d

**Alexander P. Laskovnev** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
(Associate Editor-in-Chief)

**Irina A. Starostsina** (lead editor)

**Aleksei V. Byeli** – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Pyotr A. Vityaz** – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

**Andrei Ya. Grigoriev** – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Gomel, Belarus

**Vitali G. Zalesski** – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Belarus

**Aliaksandr Ph. Ilyshchanka** – State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy – Academician  
O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Belarus

**Sergei M. Kostromitsky** – Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Belarus

**Leonid G. Krasnevski** – Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Minsk, Belarus

**Alexander P. Kren** – Institute of Applied Physics of National Academy of Science of Belarus, Minsk,  
Belarus

**Alexander M. Malyarevich** – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

**Nikolai K. Myshkin** – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Gomel, Belarus

**Oleg G. Penyazkov** – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Valeri M. Fedosyuk** – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Mikhail L. Kheifetz** – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l   C o u n c i l

**Stephan Vodenicharov** – Bulgarian Academy of Sciences, Sofia, Bulgaria  
**Jozef Gawlik** – Institute for Manufacturing Engineering and Automation of Cracow University of Technology, Poland  
**Gintautas Žintelis** – Lithuanian Academy of Sciences, Vilnius, Lithuania  
**Branko Katalinic** – TU Wien, Wien, Austria  
**Aleksandr A. Mikhalevich** – Institute of Power of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus  
**Anton G. Naumovets** – National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine  
**Konstantsin A. Solntsev** – A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia  
**Lyubodrag Tanovich** – University of Belgrade, Belgrade, Serbia  
**Boris M. Khrustal'ov** – Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus

*Address of the Editorial Office:  
1, Akademicheskaya Str., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.  
Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru  
vestift.belnauka.by*

---

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2020, vol. 65, no. 4

*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

Editor *I. A. Starostina*  
Computer imposition *A. V. Novik*

It is sent of the press 22.12.2020. Appearance 29.12.2020. Format 60×84 1/8. Offset paper. The press digital.

Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 70 copies. Order 218.

Number price: individual subscription – 12,32 byn., departmental subscription – 29,31 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya Navuka"

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina Str., Minsk, 220141, Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",  
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2020

ISSN 1561-8358 (Print)  
ISSN 2524-244X (Online)

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>80 лет Отделению физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси</b> .....	391
<b>МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ</b>	
<b>Акулович Л.М., Миранович А.В., Дечко М.М.</b> Оптимизация технологических факторов магнитно-электрического упрочнения .....	404
<b>Петрова-Буркина О.А., Рубаник В.В. мл., Рубаник В.В., Гамзелева Т.В.</b> Влияние термообработки на величину термокинетической ЭДС при обратном фазовом переходе в никелиде титана ( <i>к 45-летию Института технической акустики Национальной академии наук Беларуси</i> ) .....	413
<b>МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА</b>	
<b>Базров Б.М., Хейфец М.Л., Гуревич В.Л., Попок Н.Н.</b> Оценка производственной технологичности конструкции в жизненном цикле изделия ( <i>на английском языке</i> ) .....	422
<b>Кожевникова Г.В., Абрамов А.А., Климов К.А.</b> Прогнозирование структуры металла в процессах попеременно-клиновой прокатки .....	433
<b>Громыко П.Н., Хатетовский С.Н., Трусов И.В.</b> Влияние профиля зубьев на погрешность вращения сателлита передач эксцентрикового типа .....	445
<b>Сотник Л.Л., Русан С.И., Сиваченко Л.А., Наливко О.И.</b> Метод приближенного анализа взаимодействия материала с валками в вибривальковом измельчителе .....	453
<b>ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН</b>	
<b>Ольшанский А.И., Климентьев А.Л.</b> Кинетика теплообмена и метод расчета длительности конвективной сушки натуральной кожи .....	464
<b>Кицак А.И.</b> Эффективность тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения при нестационарном взаимодействии его частиц с горящим веществом .....	476
<b>РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ</b>	
<b>Мацулевич О.В., Крень А.П., Протасеня Т.А., Делендик М.Н.</b> Оценка погрешности косвенных измерений физико-механических характеристик материалов методом динамического индентирования .....	487
<b>ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ</b>	
<b>Сорокин В.В.</b> Расчет характеристик пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006 .....	496
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>	
<b>Соловьев В.И., Рыбальский О.В., Журавель В.В., Железняк В.К.</b> Применение нейронных сетей глубокого обучения для выявления монтажа цифровых фонограмм .....	506

**CONTENTS**

<b>80 years of the Department of Physical and Technical Sciences of the National Academy of Sciences of Belarus</b> .....	391
<b>MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY</b>	
<b>Akulovich L.M., Miranovich A.V., Dechko M.M.</b> Optimization of technological factors of magnetic-electric strengthening .....	404
<b>Petrova-Burkina O.A., Rubanik V.V., Jr., Rubanik V.V., Gamzeleva T.V.</b> Influence of heat treatment on thermokinetic EMF during reverse phase transition in titanium nickelide ( <i>to the 45th Anniversary of the Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus</i> ) .....	413
<b>MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS</b>	
<b>Bazrov B.M., Kheifetz M.L., Gurevich V.L., Popok N.N.</b> Assessment production manufacturability of the design in the product life cycle .....	422
<b>Kozhevnikova G.V., Abramov A.A., Klimov K.A.</b> Metal structure prediction in cross-wedge rolling processes ..	433
<b>Gromyko P.N., Khatetovsky S.N., Trusov I.V.</b> Influence of tooth profile on rotation error of eccentric gearing satellite .....	445
<b>Sotnik L.L., Rusan S.I., Sivachenko L.A., Naliuko O.I.</b> Method for approximate analysis of interaction of material with rolls in a vibroroll grinder .....	453
<b>POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER</b>	
<b>Ol'shanskii A.I., Klimentyev A.L.</b> Kinetics of heat and moisture exchange and method for calculating the duration of the convective drying process of natural leather .....	464
<b>Kitsak A.I.</b> Efficiency of fire extinguishing with general purpose fire extinguishing powder in case of non-stationary interaction of its particles with burning material .....	476
<b>RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING</b>	
<b>Matsulevich O.V., Kren A.P., Pratasenia T.A., Delendik M.N.</b> Evaluation of the error of indirect measurements of physical-mechanical characteristics of materials by dynamic indentation method .....	487
<b>DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS</b>	
<b>Sorokin V.V.</b> Passive autocatalytic recombiner characteristics calculation during severe accident on AES-2006 NPP .....	496
<b>INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS</b>	
<b>Solovyov V.I., Rybalskiy O.V., Zhuravel V.V., Zheleznyak V.K.</b> Application of neuron networks of deep learning for exposures editing of digital phonograms .....	506

## 80 ЛЕТ ОТДЕЛЕНИЮ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

Отделение физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси (ОФТН НАН Беларуси) создано в 1940 г. (в 1947–1963 гг. – Отделение физико-математических и технических наук, в 1988–1998 гг. – Отделение физико-технических проблем машиностроения и энергетики). Отделение возглавляли академики А. К. Красин (1962–1969 гг.), Ф. П. Винокуров (1969–1970 гг.), Е. Г. Коновалов (1970–1973 гг.), К. В. Горев (1974–1976 гг.), П. И. Ящерицын (1976–1987 гг.), С. А. Астапчик (1987–1997 гг.), Г. А. Анисович (1997–2002 гг.), член-корреспондент Ю. М. Плескачевский (2002–2003 гг.), академик С. А. Жданок (2004–2009 гг.), член-корреспондент В. М. Федосюк (2010–2014 гг.). С 2014 г. академиком-секретарем Отделения является академик А. П. Ласковнев.

Научно-исследовательскими учреждениями ОФТН НАН Беларуси созданы и реализованы крупные разработки в области современного материаловедения, машиностроения, выполняются важные и актуальные комплексные работы в области энергетики.

Разработаны и применяются в промышленности многофункциональные и специализированные материалы, технологические процессы и оборудование для их обработки с использованием высокоэнергетического воздействия. Значимые научные и практические результаты получены в области машиностроения, разработки новой конкурентоспособной продукции (автомобили, автопоезда, тракторы, автобусы, комбайны и т. п.). Получили широкое применение новые методы и приборы неразрушающего контроля и технической диагностики материалов, изделий и промышленных объектов. Разработаны энергоэффективные и экологически безопасные технологии и техника, аппараты и приборы, внедренные на предприятиях энергетики и машиностроения, агропромышленного комплекса, стройиндустрии и других отраслей промышленности. Ведутся масштабные работы по научно-техническому обеспечению Белорусской АЭС, разработке нормативно-технической базы безопасного развития атомной энергетики. Разрабатывается и поставляется белорусским предприятиям и на экспорт высокоэффективное современное оборудование на основе лазерных, плазменных, гидроабразивных технологий и др. Практически все разработки защищены патентами.

Крупный вклад в развитие науки внесли ученые Отделения. За исключительные заслуги в социально-экономическом и научно-техническом развитии Республики Беларусь звание «Герой Беларуси» присвоено академику М. С. Высоцкому, профессору, доктору технических наук П. Л. Мариеву. Лауреатами Ленинской премии стали академики А. К. Красин и Р. И. Солоухин. Государственной премии СССР были удостоены восемь членов Отделения. Научные достижения ученых Отделения отмечены Государственными премиями БССР и Республики Беларусь (более 30), другими престижными наградами.

Результаты научных и прикладных исследований, проводимых в учреждениях Отделения, публикуются в международных журналах и ежегодных сборниках, издаваемых Отделением и институтами. Так, в 2021 г. отметит 65-летие журнал «Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук». В Институте механики металлополимерных систем имени В. А. Белого издаются «Трение и износ» (англоязычная версия «Journal of Friction and Wear» выпускается в США и имеет высокий импакт-фактор) и «Полимерные материалы и технологии». Объединенный институт машиностроения выпускает международный научно-технический журнал «Механика машин, механизмов и материалов», ежегодный сборник научных трудов «Актуальные вопросы машиноведения» (с 2012 г.). При Институте тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова работает редакция «Инженерно-физического журнала», переводной версии которого («Journal of Engineering Physics and Thermophysics», издательство Springer) присвоен квартиль Q1.

В состав Отделения входят: Научно-практический центр по материаловедению (включает Институт прикладной физики, Физико-технический институт, Институт технологии металлов, Институт технической акустики, Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого), Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (включает Институт порошковой металлургии имени О. В. Романа, Молодечненский завод порошковой металлургии, Центр утилизации авиационных средств поражения, Центр утилизации артиллерийских и инженерных боеприпасов), Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны, Объединенный институт машиностроения, Институт энергетики, Институт жилищно-коммунального хозяйства, Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов, Центр радиотехники НАН Беларуси, открытые акционерные общества (ОАО) «НПО Центр», «Приборостроительный завод «Оptron», «ОКБ Академическое».

**Государственное научно-производственное объединение «Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению»** обладает высоким научно-техническим потенциалом, что позволяет осуществлять комплексные научные исследования, результаты которых широко применяются в различных сферах народного хозяйства Республики Беларусь, а также поставляются на экспорт.

Разработаны и освоены технологии создания многослойных электромагнитных и радиационных экранов для защиты интегральных микросхем, которые прошли успешные испытания на ОАО «Интеграл» и востребованы за рубежом, в частности обеспечивают высокоэффективную защиту и электромагнитную совместимость бортовых блоков международного космического аппарата «Бепи-Коломбо» (миссия на планету Меркурий).

Развиты энергоресурсосберегающие технологии синтеза сверхтвердых материалов – искусственного алмаза и кубического нитрида бора, с использованием которых создан обрабатывающий инструмент, широко применяемый на предприятиях машиностроительного комплекса, таких как Минский тракторный завод (МТЗ), Минский моторный завод (ММЗ), Минский завод автоматических линий имени П. М. Машерова и др.

Разработана технология создания композиционного магнитомягкого материала с нанометровыми диэлектрическими покрытиями и освоен выпуск изделий на его основе – магнитопроводов для трансформаторов, электродвигателей и электрогенераторов; элементов топливных фильтров для автотракторной техники. Технология востребована за рубежом.

Изучен ряд перспективных магнитных материалов, обладающих гигантским магниторезистивным и магнитоэлектрическим эффектом, что открывает новые возможности для синтеза материалов с высокими температурами ферромагнитного упорядочения для применений в спинтронике.

Исследования радиационного дефектообразования в полупроводниковых материалах микроэлектроники, таких как кремний и арсенид галлия, привели к созданию эффективных радиационных технологий управления параметрами полупроводниковых приборов (внедрены на ОАО «Интеграл», ОАО «Электромодуль»).

Созданы новые магнитные метаматериалы – магнитоплазмонные кристаллы, представляющие собой металло-диэлектрические гетероструктуры, которые обладают рекордным значением магнитооптического эффекта для разработки сверхточных фотонных устройств.

В кооперации с Физико-техническим институтом НАН Беларуси, Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники, Белорусским государственным университетом создан и испытан полномасштабный сверхпроводящий ниобиевый резонатор, который является базовым элементом международного линейного ускорителя электронов и протонов (Япония).

Разработана обладающая мировой новизной технология получения графеноподобного углерода (наноматериала на основе графита), с его использованием созданы образцы накопителей электрической энергии большой емкости – суперконденсаторы.

Развита оригинальная технология и налажено производство синтетических драгоценных камней – кристаллов изумруда.



**Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси** – ведущий научный центр в области полимерного материаловедения и трибологии, металлополимерных изделий, управления фрикционными и антифрикционными свойствами полимерных материалов и покрытий с использованием ионизирующих излучений, электрических и магнитных полей.

В области полимерного материаловедения разработаны методы управления структурой, реологическими и техническими характеристиками термопластов и термоэластопластов, созданы технологии и десятки марок конкурентоспособных полимерных композиционных материалов для машиностроения, электротехнического комплекса, железнодорожного транспорта, агротехнического комплекса и других отраслей промышленности. В области трения, изнашивания и смазки, механики контакта созданы методики и модели фрикционного контакта, тепловой динамики трения, компьютерного моделирования взаимодействия твердых тел, диагностики изнашивания машин. Разработан ряд новых приборов для анализа поверхностных слоев материалов (атомно-силовые микроскопы, адгезиометры, трибометры), созданы и внедрены композиты для узлов трения тяжелого машиностроения, материалы для скоростных железнодорожных трасс, самосмазывающиеся покрытия и смазочные материалы для узлов трения современной техники.

Институту принадлежит одно из трех открытий в области трения и смазки, зарегистрированных за время существования СССР и СНГ: «Свойство синовиальной среды обеспечивать высокую антифрикционность хрящей в суставе посредством реализации в зоне трения мезоморфного нематического состояния смазки» (1998).

В учреждении функционирует секция «Полимерные материалы» Научного совета по новым материалам Международной Ассоциации академий наук.

**Физико-техническим институтом НАН Беларуси (ФТИ)** выполняются крупные комплексные работы, востребованные в машиностроении, микроэлектронике, оборонной промышленности, медицине, строительной индустрии и других отраслях производства. Разрабатываются теоретические основы и высокоэффективные технологии получения и обработки материалов, в том числе сверхтвердых, с применением лазерных, ионных и электронных пучков, плазменных потоков, потоков тепловой энергии и электромагнитных полей; создания новых многофункциональных и специализированных материалов и покрытий с повышенными механическими, износо-, коррозионно-, жаростойкими и другими специальными свойствами; нанесения защитных, защитно-декоративных, упрочняющих, износостойких и биосовместимых покрытий на детали машин, металлообрабатывающий, штамповый и измерительный инструмент, медицинские имплантаты.

В числе разработок института:

- в области *индукционных технологий*: универсальные установки для высокочастотной поверхностной термообработки зубчатых колес сельскохозяйственной техники (поставлены на ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш»); технология закалки длинномерных деталей длиной до 5 м и массой более 3 т, которая освоена на ОАО «Белвторчермет»; технологии и оборудование для создания упрочненных слоев деталей гидромеханических трансмиссий, редукторов мотор-колес и тормозных систем автомобилей БЕЛАЗ грузоподъемностью до 450 т; технологии, автоматизированная установка для пайки и термической обработки инструмента ОАО «Оршанский инструментальный завод»; производство полупроводниковых генераторов и индукционных установок для нагрева металла под пластическую деформацию и термообработку;

- в области *технологий химико-технической обработки*: промышленное оборудование для ионно-плазменной обработки; производство автоматизированного оборудования ионно-плазменной цементации поверхности деталей в интересах организаций машиностроения (ОАО «Могилевлифтмаш» и др.).

- в области *электронно-лучевой сварки*: технология электронно-лучевой сварки рабочих поверхностей образцов сверхпроводящих ниобиевых резонаторов;

- в области *обработки металлов давлением*: автоматизированный комплекс для точного формообразования наружных поверхностей несущих осей сельскохозяйственной техники ОАО «Управляющая компания холдинга «Бобруйскагромаш»; не имеющие аналогов в мировой практике технологии получения полуфабрикатов компонентов эндопротеза коленного сустава; технология и единственное в Беларуси производство облегченных бронежилетов на основе бронекomпозиционных панелей, обеспечивающих защиту по Бр5 классу;

- в области *магнитно-импульсных технологий*: магнитоимпульсный пресс с числовым программным управлением для ОАО «Белорусский автомобильный завод» (ОАО «БЕЛАЗ»);
- в области *формирования покрытий различного назначения*: технологии нанесения защитных и просветляющих алмазоподобных углеродных покрытий ИК-диапазона на поверхность оптических изделий, формирования многослойного покрытия на электромагнитных экранах, в том числе прозрачных; технологические процессы формирования для НП ООО «Медбиотех» и ООО «Проекция» защитно-декоративных покрытий на основе оксидов титана на имплантатах из титановых сплавов;
- в области *композиционных материалов*: технология и производство на ОАО «Обольский керамический завод» строительной керамики с улучшенными термомеханическими и цветовыми характеристиками, огнеупоров и защитных термостойких покрытий;
- в области *литейных технологий*: литейный участок для внедрения технологических процессов изготовления новой продукции для различных отраслей экономики и поставки на экспорт; технология проката конструкционных сталей для машиностроительных предприятий с учетом государственных и европейских стандартов.

Ежегодно на базе института проводится Международная научно-техническая конференция «Современные методы и технологии создания и обработки материалов».

**Институт технологии металлов НАН Беларуси** ведет научную и научно-техническую деятельность в области теплофизики и гидродинамики специальных видов литья, управления процессами формирования структуры и свойств металлов и сплавов при их кристаллизации и затвердевании, создания новых материалов и технологий их получения, обработки и упрочнения. Более 1000 разработок ученых защищены авторскими свидетельствами СССР, патентами Республики Беларусь и зарубежных стран. Создано и внедрено в производство более 80 наименований инновационных технологий и оборудования, в частности не имеющая мировых аналогов технология непрерывно-циклического литья «намораживанием» высокоизносостойких деталей из чугуна, поставляется широкая номенклатура деталей более чем 200 покупателям из различных стран, в том числе США, Германии, Франции. За создание и промышленную реализацию нового метода присуждена Государственная премия Республики Беларусь 2010 года в области науки и техники. Разработаны и поставлены около 20 линий для непрерывного горизонтального литья цветных металлов и сплавов и чугуна, 10 из них – за рубеж. За разработку и внедрение способа наклонно-горизонтального литья ученые института были удостоены Государственной премии БССР 1990 года.

Для оборонной промышленности создана не имеющая аналогов в мире технология и оборудование для изготовления литой катодной ленты для использования в химических источниках тока большой мощности. Технологические линии поставлены компаниям России, Индии и Китая.

Разработанный технологический процесс изготовления горячекатаных цинковых анодов из отходов гальванического производства Белорусского металлургического завода (БМЗ) позволил получить суммарный экономический эффект свыше 1 млн долл. США.

Институт участвует в создании и модернизации литейных производств предприятий республики. За последние 10 лет разработано и изготовлено 12 видов технологического оборудования, выпущено импортозамещающей продукции на сумму свыше 5 млн долл. США, на экспорт поставлено продукции на сумму около 2 млн долл. США.

**Институт технической акустики НАН Беларуси** является ведущей организацией страны по созданию научных основ, разработке оборудования и технологий использования мощного ультразвука в процессах деформирования, термической обработки, сварки и обработки различных материалов для предприятий машино- и приборостроения, легкой промышленности, энергетики, медицины и др.

В области *мощного ультразвука* разработаны и внедрены: оборудование и технология ультразвукового тиснения по коже, тканым и нетканым материалам, термопластичным полимерным материалам (СООО «Белвест»); технология ультразвуковой упрочняющей поверхностно-чистой обработки деталей из сталей, чугунов, цветных металлов и сплавов (ОАО «558-й АРЗ»); ультразвуковой инструмент для резки полотна автомобильных шин, полимерных и других материалов (ОАО «Белшина»); запаиватель ультразвуковой для герметизации контейнеров систем для сбора, хранения и переработки крови (учреждения здравоохранения Республики Беларусь); технология и оборудование ультразвуковой сварки полимерных материалов (ОАО «Инвет»,

ООО «Тридо Тойз», ОАО «Руденск», ОАО «Витязь» и др.); ультразвуковое оборудование для сварки респираторов и медицинских масок (ОАО «Техника связи», ООО «Смоленский электротехнический завод», Российская Федерация).

В области *энерго- и ресурсосбережения* разработаны и внедрены: датчики объема топлива для автотракторной промышленности, позволяющие проводить оценку сортности нефтепродукта (ОАО «Витебский завод электроизмерительных приборов»); автоматизированные системы счетчиков электрической энергии (РУП «Витебскэнерго»), учета мазута в резервуарах (РУП «Витебскэнерго», РУП «Брестэнерго»).

В институте создана научная школа по термоупругим фазовым превращениям, исследования свойств интеллектуальных материалов на основе TiNi-сплавов легли в основу разработки технологий их обработки для изготовления изделий технического и медицинского назначения. Одной из значимых разработок в этой области является конструкция и технология изготовления стентов колоректальных из TiNi-сплава, предназначенных для лечения злокачественных новообразований. Разработка не имеет аналогов в Республике Беларусь, странах СНГ и успешно прошла клинические испытания на базе учреждений здравоохранения.

За разработку научных основ использования мощного ультразвука в процессах обработки материалов институту присуждена Государственная премия БССР 1984 года.

**Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ГНПО ПМ)** – ведущий межотраслевой центр в Республике Беларусь по созданию широкого класса новых материалов и изделий методами порошковой металлургии, 3D-печати, взрывной обработки, нанесения защитных и функциональных покрытий, специальными методами сварки, резки, пайки и наплавки, а также выполняющий важные для республики работы по утилизации боеприпасов.

В числе важнейших результатов: композиционные материалы на основе карбида кремния для оптической и оптоэлектронной промышленности, а также спектрографов и лазерной техники (ТОП 10 за 2016 г.); технологии термоградиентного газофазного уплотнения и получения сплава на основе W–Ni–Fe, которые успешно применяются при выполнении специальных программ «Гроза» и «Топаз»; разработка и промышленное производство тепловых труб с капиллярно-пористой порошковой структурой, применяемых для эффективного охлаждения элементов электронных и электротехнических устройств (Объединение является европейским лидером по данному вопросу, подобные изделия производятся только в Японии, Китае и США); разработка высокопрочных деталей из порошковых легированных сталей; оборудование и технологии ионно-плазменной химико-технической обработки – цементации и нитроцементации, меднения, обеспечивающие повышение качества обрабатываемых изделий и их эксплуатационных характеристик; новые технологии получения биметаллов электротехнического назначения, синтеза ультрадисперсных алмазов, нанопорошков сверхтвердых материалов на основе высокоэнергетических методов воздействия; композиционные порошки с использованием механоактивации и СВС-процессов, технологии нанесения защитных покрытий для широкого применения в энергетике.

Новые перспективные направления ГНПО ПМ – сварка трением с перемешиванием, технологии получения порошков для 3D-печати, радиопоглощающих покрытий.

В Объединении функционируют аккредитованные в национальной системе сертификации Республики Беларусь испытательный центр металлических и неметаллических материалов и изделий из них, контрольно-испытательная лаборатория сварочной продукции, орган по сертификации пиротехнических изделий, взрывчатых веществ и др. При Объединении работают два национальных технических комитета: ТК-8 «Порошковые, композиционные, сверхтвердые материалы и изделия, взрывчатые вещества» и ТК-5 «Сварка и родственные процессы», которые обеспечивают координацию работ в республике по разработке государственных стандартов.

Ежегодно ГНПО ПМ проводит крупные международные форумы: научно-техническую конференцию «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия, сварка» и симпозиум «Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка».

**Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси** является ведущей научной организацией страны, обеспечивающей разработку машин, материалов и технологий, их испытания и сертификацию, сопровождение постановки на производство, повышение надежности,

ресурса и качества машин и оборудования. Деятельность института основана на концепции «цифрового производства» по следующим фундаментальным и прикладным направлениям:

- машиноведение, механика, надежность и безопасность машин и технических систем; проектирование, моделирование и испытания машин и механизмов; управление структурой и свойствами материалов, изделий машиностроения;
- разработка автомобилей, колесных тягачей и автопоездов, в том числе с электрическими и гибридными силовыми установками; автобусов и электробусов; тракторной, комбайновой, дорожно-строительной, коммунальной техники, карьерных самосвалов грузоподъемностью до 500 т; роботизация и электронизация мобильных машин.

Институт – межотраслевой центр, который выполняет роль кластера машиноведения в авто-тракторокомбайностроении и секторе высокотехнологичного оборудования, на протяжении 25 лет является головной организацией по крупнейшим государственным программам в данной области. Институт координирует работу научно-технического центра карьерного транспорта НАН Беларуси – ОАО «БЕЛАЗ», научно-производственного центра ОАО «БМЗ» – НАН Беларуси. Сотрудники института входят в научно-технические советы семи крупных холдингов, возглавляют три технических комитета Госстандарта. Институт аккредитован в Национальной системе подтверждения соответствия Республики Беларусь как техническая служба E28Q Женевского соглашения и как орган по сертификации продукции и услуг, систем менеджмента качества «АКАДЕМ-СЕРТ».

В состав института входит уникальный для нашей страны полигон для испытаний мобильных машин, которых на территории бывшего СССР только два, включающий динамометрическую дорогу 3,3 км под осевую нагрузку до 20 т и специальный корпус для испытаний.

Институт выполняет крупные отраслевые проекты развития промышленности, в том числе по новой технике Минского автомобильного завода (МАЗ), БЕЛАЗ, МТЗ, двигателям ММЗ и «Могилевлифтмаша», электротехнологиям для транспорта, проблемам надежности и качества техники.

Выполнен ряд актуальных разработок, в том числе созданы: макетный образец электромобиля на базе серийного прототипа GEELY SC-7; образцы тяговой аккумуляторной батареи электромобиля, электронные системы управления тяговой батареей и электродвигателем, образец отечественного электродвигателя легкового электромобиля; экспериментальный образец электромобиля на базе автомобиля JOYLONG EF5; макетный образец электромобиля каркасно-панельной конструкции; система расчета, принципы конструирования и испытаний электропривода, аккумуляторной батареи и силовой электроники под любой (заданный) кузов электромобиля; гибридная силовая установка карьерного самосвала БЕЛАЗ грузоподъемностью 90 т, электро-механическая силовая установка электрогрузовика МАЗ-4371; конструкторские и дизайнерские решения малогабаритной коммунальной машины и автобуса для перевозки пассажиров в аэропортах; программно-аппаратное обеспечение системы вибромониторинга трансмиссионных узлов автотракторной техники; травмобезопасные мобильные прицепные демпферные устройства для машин дорожных служб; образцы модульных программно-управляемых средств для скоростной прецизионной механической обработки для базового оборудования ОАО «Планар».

Разработанная в институте спецсталь (20ХНЗМА) принята к серийному производству всего типоряда крупногабаритных зубчатых колес для самосвалов БЕЛАЗ; технология динамической стабилизации фрикционных дисков освоена в ОАО «БЕЛАЗ», технологии инженерии поверхности реализуются в России, Корее, Китае; разработки по тракторной электрогидравлике обеспечили импортозамещение для МТЗ и позволят выйти на международный рынок (Россия, Украина и др.).

В институте действуют две уникальные отраслевые лаборатории по исследованиям и испытаниям автокомпонентов и мобильных машин и по проектированию и испытаниям электромо- билей и компонентов электропривода.

Основные крупные проекты на 2020–2025 годы: разработка, испытания и сертификация опытных образцов компонентов электросиловых установок (электродвигатели, накопители энергии, системы управления, силовая электроника) для легкового и грузового электротранспорта; создание экспериментальных производств электромо- билей типа минивэн, каркасно-панельных электромо- билей различного назначения, накопителей энергии на основе энергетических ячеек. Это основа для новой индустрии в белорусском машиностроении, экологический имидж и возможность участия в международной кооперации.

**Институт прикладной физики НАН Беларуси** является ведущим научным центром в Республике Беларусь в области физики неразрушающего контроля и технической диагностики материалов, изделий, промышленных объектов, создания научных основ информационных технологий непосредственно для промышленных предприятий Республики Беларусь, что позволяет повысить качество и конкурентоспособность национальной продукции, надежность и безопасность функционирования промышленных объектов.

Учеными института созданы следующие инновационные разработки:

- для метрологического обеспечения магнитных измерений в Республике Беларусь три Национальных эталона единиц магнитной индукции: постоянного магнитного поля, слабого постоянного магнитного поля и переменного магнитного поля; научные и метрологические основы для сертифицированных испытаний широкого класса магнитомягких материалов;

- серия толщиномеров для измерения толщины различных покрытий, в том числе ультразвуковой метод и устройство ИЧ-31 для измерения глубины упрочненных слоев с точностью 0,1 мм, не имеющий аналогов в мире;

- серия вихретоковых приборов и устройств, включающая толщиномеры, а также дефектоскопы и автоматизированные дефектоскопические комплексы с высокой чувствительностью к нарушениям сплошности материала;

- портативный радиолокатор для визуализации структуры строительных конструкций, обнаружения неоднородностей в них, содержащий сверхширокополосную антенную систему и радиолокационный тракт с пониженным уровнем помех, что позволяет обнаруживать мелкие неоднородности в бетонных конструкциях;

- ряд приборов для контроля физико-механических свойств материалов, в том числе портативный твердомер ТПЦ-7 для неразрушающего измерения твердости изделий из сталей, обладающий малыми габаритными размерами и массой; измеритель свойств чугуна ИФМЧ – уникальный специализированный прибор для неразрушающего контроля физико-механических характеристик чугуна различных марок;

- программно-аппаратный комплекс ИСУМ-1 для измерения твердости и модуля упругости углеродных и графитовых материалов, индикатор И4-М для определения внутренних механических напряжений в резьбовых соединениях;

- для электротехнической промышленности установка для испытаний магнитопроводов трансформаторов тока, включая трансформаторы коммерческого учета электроэнергии.

На таких знаковых объектах Республики Беларусь, как «Минск-Арена», «Минск-Чижовка», Центр фристайла, высотные здания «Парус» и «Грин-Сити» в г. Минске внедрена разработанная в институте система автоматического мониторинга, предназначенная для непрерывного наблюдения за состоянием несущих конструкций зданий и сооружений в ходе их строительства и эксплуатации, включающая прецизионные датчики, системы цифровой передачи данных к вычислительному серверу, программное обеспечение для обработки сенсорных данных и систему оценки безопасности строительных конструкций.

Разработан метод реконструкции динамических полей концентрации электронов в ионосфере, позволяющий осуществлять реконструкцию по данным высокоорбитальных навигационных систем ГЛОНАСС/GPS.

Развиваются новые направления исследований в области неразрушающего контроля, в частности предложен метод определения толщины тонких магнитных пленок, применяющихся в микроэлектронике и вычислительной технике.

**Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси** является ведущим научным центром Республики Беларусь в области фундаментальных и прикладных проблем тепломассопереноса, механики жидкости, газа и плазмы, химической физики, горения и взрыва, физики экстремальных состояний вещества, энергетики. Деятельность института направлена на создание энергоэффективных и экологически безопасных технологий и техники, аппаратов и приборов для энергетики и машиностроения, агропромышленного комплекса и стройиндустрии, медицины, химической, электронной, радиотехнической, пищевой промышленности, космической отрасли.

Получены важные фундаментальные результаты по теплофизике и гидрогазодинамике явлений и процессов переноса энергии и вещества в средах различного агрегатного состояния при наличии фазовых и химических превращений в условиях воздействия физических полей и параметров процессов. Разработаны принципы модернизации оборудования для термической обработки металлов, технологии и установки высокоточного магнитореологического полирования оптических деталей, башенной испарительной градирни ТЭЦ с улучшенной аэродинамикой паровоздушного потока, технологии и установки для получения наноматериалов, диагностические комплексы на базе атомного силового микроскопа, технологии и оборудование для переработки отходов, высоковольтные источники питания для создания низкотемпературной плазмы барьерного разряда и др. эффективные разработки.

В числе важнейших разработок:

- широкий типоряд электропечей сопротивления (рабочие температуры до 1600 °С), обеспечивающих снижение энергопотребления и повышение качества термообработки металлов. Барановичским станкостроительным заводом ЗАО «АТЛАНТ» изготовлены совместно разработанные энергоэффективные электропечи сопротивления для потребителей Республики Беларусь и на экспорт;
- технологии и оборудование для магнитореологического полирования оптических элементов из оптических и полупроводниковых материалов с плоской, сферической и асферической формой поверхности размерами 10–2500 мм;
- научные основы и технологии высокоэффективного сжигания биотоплив в циклонно-слоевых топках с повышенным КПД и минимальными выбросами;
- модули для оптического, флуоресцентно-оптического и контактно-зондового анализа живых клеток *in vitro*;
- автоматизированная система контроля и управления процессом газовой цементации, позволяющая сократить общее время цементации на 10–20 % и повысить качество обработки;
- установка комбинированной термолизно-плазменной газификации для экологически безопасной переработки или утилизации широкого спектра отходов с преобладающей органической частью;
- новая многостадийная технология производства и опытные образцы подложек зеркал для космических телескопов диаметром 200 мм на основе композитного материала Si/SiC, обладающего одним из лучших в мире сочетанием физико-механических свойств.

Высокоэффективные разработки института в течение последних 10 лет обеспечивали ежегодный объем экспорта 2,5–4,5 млн долл. США.

Институт является организатором ряда крупных научных конференций – Минского международного форума по тепло- и массообмену, международных конференций «Тепловые трубы, тепловые насосы, холодильники, новые источники энергии», Минского международного коллоквиума по физике ударных волн, горения и детонации, «Методологические аспекты сканирующей зондовой микроскопии», «Фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах».

**В Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси (ОИЭЯИ – Сосны)** стратегическими направлениями научных исследований и разработок являются исследования и разработки в областях:

- атомной энергетики, научного сопровождения строительства АЭС в Республике Беларусь;
- ядерных и радиационных технологий в интересах различных отраслей народного хозяйства;
- обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом;
- ядерной физики, физики элементарных частиц, физики высоких энергий.

Для проведения фундаментальных исследований и решения прикладных задач в институте создана уникальная экспериментальная база. Для экспериментальных исследований физики нейтронных размножающих систем, физических характеристик активных зон перспективных ядерных энергетических установок предназначены универсальный критический стенд «Гиацинт» и критический стенд «Кристалл». Создана и введена в эксплуатацию система нагрева уран-водных сборок для экспериментальных исследований температурных эффектов реактивности. Для исследований физики и кинетики подкритических систем, управляемых внешним источником нейтронов, создан и эксплуатируется ядерно-физический подкритический комплекс «Яліна». Комплекс научно-исследовательских и опытно-промышленных работ выполняется на

мощной изотопной гамма-установке УГУ-420, ускорителе электронов УЭЛВ-10-10, установке по переработке жидких радиоактивных отходов.

Институтом проведены технико-экономические исследования, разработано научно-техническое обоснование, выполнена стратегическая экологическая оценка и разработан проект Стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС, утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22.08.2019 № 558.

ОИЭЯИ – Сосны получена первая в Республике Беларусь лицензия на право проведения экспертизы безопасности при осуществлении деятельности в области использования атомной энергии. Более 30 сотрудников имеют в установленном порядке допуски к проведению экспертиз, создан и функционирует соответствующий экспертный совет. С 2012 г. выполнен большой объем работ по проведению экспертиз документов, обосновывающих обеспечение ядерной и радиационной безопасности при осуществлении деятельности в области использования атомной энергии в части размещения, сооружения, ввода в эксплуатацию Белорусской АЭС, экспертиза результатов целевой переоценки безопасности Белорусской атомной электростанции (стресс-тестов).

В институте создан Экспертный научно-технический центр НАН Беларуси, осуществляющий научно-техническую поддержку системы ситуационных кризисных центров в области принятия решений по защите персонала и населения в случае ядерных и радиационных аварийных ситуаций.

Большая и ответственная работа проводится в ОИЭЯИ – Сосны по выполнению Республикой Беларусь международных обязательств в рамках Договора о нераспространении ядерного оружия, Соглашения о гарантиях МАГАТЭ о непереключении ядерных материалов с мирной на военную деятельность, Конвенции о физической защите ядерных материалов, Конвенции о ядерной безопасности, Объединенной конвенции о безопасности обращения с отработавшим топливом и о безопасности обращения с радиоактивными отходами.

По инициативе Объединенного института энергетических и ядерных исследований — Сосны НАН Беларуси проводятся ежегодные международные конференции «Нелинейные явления в сложных системах» и «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века».

**Институт энергетики НАН Беларуси** выполняет научные исследования и разработки в рамках решения научных задач обеспечения энергетической безопасности государств; разработки методологии планирования развития энергетического комплекса; научно-технического обеспечения использования местных видов топлива и возобновляемых источников энергии; энергетических обследований предприятий и организаций (энергоаудиты), разработки норм расходования топливно-энергетических ресурсов, энергосберегающих мероприятий и планов их реализации; разработки и внедрения энергоэффективных технологий и оборудования.

В числе основных результатов работы института:

- разработан программный комплекс поддержки принятия решений по стратегии развития энергетике, определены основные угрозы энергетической безопасности страны;
- определен теоретически и технически возможный потенциал увеличения электропотребления при переходе к строительству многоквартирных жилых зданий с системами отопления и горячего водоснабжения на основе использования электроэнергии;
- разработана автоматизированная система лучистого обеспечения технологических условий для создания индивидуальных параметров микроклимата в помещениях или отдельных участках в промышленности, сельском хозяйстве, на объектах социального назначения, позволяющая уменьшить затраты энергии на обогрев в 1,5–2 раза;
- создан экспериментальный гелиоэнергетический стенд для эксплуатационных исследований фотоэлектрических модулей и гелиоколлекторов в природно-климатических условиях Беларуси;
- разработано пиролизное оборудование по производству древесного угля, обеспечивающее высокую энергоэффективность процесса;
- создано оборудование для утилизации как органических, так и опасных отходов с возможностью использования полученной тепловой энергии для отопления жилых и нежилых помещений.

Центром коллективного пользования Института по энергоаудиту проведено свыше 70 энергетических обследований крупнейших организаций республики («Полимир» ОАО «Нафтан», ОАО «Мозырский нефтеперерабатывающий завод», ОАО «МАЗ», ОАО «Беларуськалий», ОАО «БМЗ», ОАО «МТЗ», ОАО «Белорусский цементный завод» и др.).

В 2018 г. создан **Институт жилищно-коммунального хозяйства НАН Беларуси**, целью деятельности которого является проведение научных исследований в области развития жилищно-коммунального хозяйства, формирования отраслевой научной и инновационно-технической политики.

Основные направления деятельности института: экономика жилищно-коммунального хозяйства; «умные» технологии эксплуатации объектов жилищного и коммунального хозяйства; новые методы и системы управления коммунальными ресурсами и обращения с отходами.

Институтом в 2018–2020 гг. разработаны:

- теоретические основы совершенствования системы управления водоснабжением и водоотведением в жилищно-коммунальном хозяйстве Республики Беларусь;
- концепция автоматизированной системы безопасной эксплуатации помещений различного назначения на основе газовых сенсоров, интегрированных в действующую систему предупреждения возникновения пожаров в Республике Беларусь;
- теоретико-методологические основы развития жилищного хозяйства, обоснованы и систематизированы методологические подходы к классификации объектов жилищного фонда по степени внедрения информационных технологий, экологической состоятельности, энергетической эффективности и соответствия уровню развития цифровой экономики.
- проект реестра эффективных технологий по обращению с твердыми коммунальными отходами для условий Республики Беларусь;
- совместно с Министерством жилищно-коммунального хозяйства Стратегия научно-технического и инновационного развития жилищно-коммунального хозяйства Республики Беларусь на 2021–2025 годы.

Также проведены исследования морфологического состава полимерных отходов в составе твердых коммунальных отходов и подготовлены предложения по их вторичному использованию.

Институт принимает активное участие в республиканских семинарах и международных научных конференциях. 3–4 октября 2019 г. институтом проведена I Международная научно-практическая конференция «Научно-технический прогресс в жилищно-коммунальном хозяйстве», которая стала ежегодным мероприятием.

**ОАО «НПО Центр»** является одним из ведущих разработчиков технологий и производителей оборудования для переработки рудных и нерудных материалов, уникальным производителем раскройного, литейного оборудования и центробежной техники, применяемой как в промышленности, так и в научных и медицинских целях. Структура предприятия позволяет осуществлять полный цикл работ: от научных исследований новейших достижений в области машиностроения, а также технологий переработки минеральных материалов до проектирования и серийного изготовления современных технологических комплексов.

Предприятие занимает ведущие позиции на внутреннем рынке, наладило серийные поставки технологического оборудования для переработки минерального сырья в Россию, Украину, Вьетнам, Гану, Индию, Казахстан, Узбекистан и др.

Импортозамещающие технологии ОАО «НПО Центр» нашли свое применение на предприятиях Республики Беларусь. Так, внедрение дробилок на ОАО «Беларуськалий» позволило обеспечить прирост товарного производства на 15 %. На ОАО «Белорусский цементный завод» впервые в республике начато производство высококачественной извести для цементных производств на отечественном оборудовании. Линия по использованию местных видов сырья (торфа) в производстве цемента разработана и внедрена на ОАО «Красносельскстройматериалы». Замена на ОАО «Полоцкстекловолокно» струйных мельниц для помола песка и эрклеза на измельчительные комплексы ОАО «НПО Центр» дала ежемесячную экономию энергозатрат на сумму более 100 тыс. долл. США.

Сегодня на РУПП «Гранит» (г. Микашевичи) более 70 % высококачественного кубовидного щебня (порядка 11 млн т в год) выходит из центробежно-ударных дробилок производства ОАО «НПО Центр». Оснащение двух крупнейших карьеров предприятия оборудованием научно-производственного объединения позволило организовать поставки качественного щебня для строительства Белорусской АЭС, а также наладить его экспортные поставки на рынки России, Украины и стран Европейского союза. В 2020 году ОАО «НПО Центр» разработана и введена



в эксплуатацию на РУПП «Гранит» первая в мире технологическая линия по получению высококачественного кубовидного щебня фракции 25–60 мм для балластного слоя высокоскоростных железнодорожных путей, которая позволит в промышленных масштабах получать крупнофракционный железнодорожный кубовидный щебень и существенно повысить качество и прочность железнодорожного полотна.

Важным проектом, реализованным научно-производственным объединением, стала разработка и изготовление комплексной технологической линии по производству синтетического гипса для нейтрализации кислых стоков ОАО «СветлогорскХимволокно», что позволило получить оптимально измельченный известняк и обеспечить качество получаемого синтетического гипса и полноту нейтрализации раствора серной кислоты.

Объединением разработан и освоен в производстве ряд современных автоматизированных комплексов плазменного и гидроабразивного раскроя листовых металлических и неметаллических материалов, которые позволяют исключить ряд последующих операций механической обработки за счет высокого качества и точности реза. Более 40 раскройных комплексов ОАО «НПО Центр» поставлены и успешно эксплуатируются на предприятиях республики.

Во исполнение поручений Главы государства в 2016 г. на базе ОАО «НПО Центр» создан уникальный для Беларуси Научно-производственный комплекс электронно-лучевой сварки. Предприятием наработан обширный опыт применения электронно-лучевой сварки при изготовлении сложотехнических изделий, в том числе оборудования для исследований в области термоядерного синтеза, проводимых в Российской Федерации. Разработка данной технологии позволила предприятию выполнить также широкий спектр опытно-конструкторских работ: от организации восстановительного ремонта мотор-колес ОАО «БЕЛАЗ» до изготовления шестерен новейших гидротрансформаторных коробок передач ОАО «АМКОДОР».

ОАО «НПО Центр» является единственным предприятием республики, обеспечивающим научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы, разработку конструкторской и технологической документации, изготовление опытных образцов и наладку серийного выпуска таких технологически сложных и уникальных для Беларуси изделий, как пресс-формы для проекта производства пластиковых лыж Управления делами Президента Республики Беларусь.

Учитывая взятый республикой курс на развитие аэрокосмической отрасли, одним из перспективных направлений деятельности предприятия является проведение полного спектра комплексных испытаний, в том числе испытания на линейные перегрузки в сочетании с вибрацией, температурными и климатическими факторами на этапе проектирования и прототипирования, что делает возможным снижение стоимости разработки изделий авиакосмической отрасли более чем на 80 %.

Компетенции ОАО «НПО Центр» в разработке уникального испытательного оборудования и проведении испытаний объектов авиа- и ракетостроения СССР, а также сохранившаяся инфраструктура позволяют создать на базе НАН Беларуси единый многофункциональный межотраслевой испытательный комплекс, который позволит ускорить разработку и повысить надежность современной, в том числе и гиперзвуковой, аэрокосмической техники.

**ОАО «Приборостроительный завод «Оptron»** является разработчиком технологий и оборудования в области персональных электротранспортных средств (ПЭТС) и их компонентов: мотор-колес, литий-ионных аккумуляторных батарей, блоков управления электродвигателями. На сегодняшний день разработан модельный ряд вентильных электродвигателей мощностью от 0,25 кВт до 30 кВт, контроллеров управления электросиловыми установками и других компонентов, на базе которых изготовлены опытные партии типовых представителей ПЭТС: двухколесный электровелосипед, трехколесный электровелосипед, электросамокат, электрифицированная приставка к инвалидному креслу, электроскутеры, электромотоциклы. Организован экспериментальный участок, на котором производится сборка литиевых батарей.

В числе основных направлений деятельности предприятия создание мехатронных систем, в том числе планетарно-цевочных редукторов и мотор-редукторов, которые обладают большей нагрузочной способностью, высокими КПД и кинематической точностью. Разработана методика прочностного расчета узлов и освоено серийное производство типоразмерного ряда планетарно-цевочных редукторов и мотор-редукторов, которые нашли широкое применение в таких областях, как точная механика и робототехника, в военно-промышленном комплексе,

сельскохозяйственной отрасли, машиностроительной и строительной отраслях. Освоено производство спасательной противопожарной техники: стволов пожарных ручных универсальных, предназначенных для тушения пожаров и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

**РУП «Научно-производственный центр многофункциональных беспилотных комплексов»** является ведущим центром по проведению исследований и созданию разработок в областях: авиастроения, конструирования летательных аппаратов, авионики и управления полетом летательных аппаратов; беспилотных авиационных комплексов, включая аппараты самолетного типа и на базе дирижаблей, наземные пункты управления, аппаратно-программные и пилотажно-навигационные комплексы, а также тренажеры по подготовке операторов беспилотных летательных аппаратов (БЛА).

Предприятием выполнен ряд комплексных работ по созданию беспилотных авиационных комплексов (БАК) и их отдельных составных подсистем, тренажеров, стендового и другого оборудования; разработаны 10 типов и модификаций БАК («Бусел», «Ворон», «Бусел М», «Бусел М40», «Бусел М50», «Бусел МБ», «Буревестник», «Дрон», «Мишень», «Буревестник МН»).

На предприятии серийно производятся такие подсистемы БАК, как: оптико-электронные системы на гиостабилизированной платформе; малогабаритные пилотажно-навигационные комплексы; устройства запуска БЛА; наземные приемо-передающие комплексы; тренажеры для подготовки стрелков-зенитчиков ПЗРК и операторов беспилотных авиационных комплексов; комплексные испытательные моделирующие установки для моделирования полета различных БЛА и работы бортовых систем летательных аппаратов; динамические стенды для настройки и отработки параметров пилотажно-навигационных комплексов и др.

Предприятием разработаны и внедрены в производство: беспилотный авиационный комплекс «Буревестник» для МЧС Республики Беларусь; беспилотный авиационный комплекс мишеней для Министерства обороны Республики Беларусь; семейство БЛА «Бусел» различного назначения с радиусом применения до 70 км; беспилотный авиационный комплекс экологического мониторинга на базе дирижабля БАК ЭМ; тренажер для подготовки операторов БЛА.

Применение беспилотных летательных аппаратов, производимых предприятием, позволяет решать задачи дистанционного мониторинга местности и объектов в интересах обороны, оценки развития чрезвычайных ситуаций, решения задач охраны границ, лесных массивов, борьбы с браконьерством и др. Продукция Научно-производственного центра многофункциональных беспилотных комплексов положительно оценена потребителями из стран СНГ, Персидского залива, Юго-Восточной и Центральной Азии.

В **Республиканском научно-производственном унитарном предприятии «Центр радиотехники НАН Беларуси»** основными направлениями деятельности являются: фундаментальные и прикладные проблемы радиолокации и радиоэлектронной борьбы; разработка новых принципов и алгоритмов работы перспективных систем и устройств радиолокации и радиоэлектронной борьбы; создание современных систем и устройств радиолокационных станций и средств радиоэлектронной борьбы.

Предприятие является экспортно-ориентированным, аккредитовано в качестве научной организации и имеет все необходимые виды лицензий для выполнения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

В числе основных достижений предприятия можно назвать следующие:

- разработка теоретических основ создания и проведение моделирования воздействия многолучевых пространственно-распределенных помех на защищенные приемники современных пользователей систем глобальной навигации;
- результаты оценки свойств частотно-коррелированных, частотно-резонансных и многочастотных радиолокационных портретов целей при их использовании в задачах радиолокационного распознавания;
- разработка полевого радиолокатора для обнаружения наземных целей для применения в охране объектов;
- выполнение ряда важных научно-исследовательских работ по созданию фазированной антенной решетки, разработке системы мониторинга помеховой обстановки, статистических методов и способов обработки результатов измерений в радиотехнических системах.

Предприятие активно работает по развитию перспективных направлений деятельности, в том числе по обнаружению и визуализации живых существ за непрозрачными препятствиями, включая стены строений, разработке радиолокационных станций обнаружения сверхмалых подвижных наземных и низколетящих объектов (дронов) в широком секторе углов, другим новым направлениям.

*Поздравляем коллективы Отделения физико-технических наук Национальной академии наук Беларуси, руководителей, ученых, специалистов, всех работников организаций Отделения с юбилейной датой. Желаем всем крепкого здоровья, дальнейших творческих успехов в развитии научных исследований, создании и практической реализации перспективных научно-инновационных разработок в целях расширения и углубления научно-технического потенциала Республики Беларусь.*

*Академик-секретарь Отделения  
физико-технических наук НАН Беларуси  
академик А. П. Ласковнев*

*Заместитель академика-секретаря Отделения  
физико-технических наук НАН Беларуси  
доктор технических наук Т. Л. Талако*

*Заместитель академика-секретаря Отделения  
физико-технических наук НАН Беларуси  
доктор технических наук А. Г. Кравцов*

*Ученый секретарь Отделения  
физико-технических наук НАН Беларуси  
кандидат технических наук В. А. Гайко*

## **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

### **MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY**

УДК 621.791.92:621.81  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-404-412>

Поступила в редакцию 06.04.2020  
Received 06.04.2020

**Л. М. Акулович, А. В. Миранович, М. М. Дечко**

*Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

### **ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО УПРОЧНЕНИЯ**

**Аннотация.** С целью определения оптимальных значений технологических факторов магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) выполнено экспериментальное исследование процесса нанесения покрытия из ферромагнитного порошка Fe – 2 % V на детали из стали 30ХГС (ГОСТ 4543-71). В качестве параметров оптимизации МЭУ приняты производительность процесса и сплошность покрытия. Методом планирования экспериментов на основе 5-факторного центрального композиционного ротatable-плана получены стохастические модели в виде регрессионных уравнений второго порядка. Установлено, что технологическим фактором, наиболее влияющим на оба параметра, является величина магнитной индукции в рабочем зазоре. С ее возрастанием производительность процесса и сплошность покрытия увеличиваются нелинейно до предельного максимального значения, что объяснено механизмом формирования в рабочем зазоре токопроводящих цепочек с различной электрической проводимостью и различным направлением относительно магнитных силовых линий. Для определения оптимального режима МЭУ решены задачи поиска максимумов наибольшей производительности и сплошности покрытия в границах исследованного факторного пространства. Найденные оптимальные по каждому отдельному параметру режимы МЭУ совпадают только по величине магнитной индукции и плотности разрядного тока. Оптимальные значения остальных управляющих факторов лежат в разных областях факторного пространства для разных параметров оптимизации. Для поиска компромиссных по обоим критериям режимов МЭУ решена задача многокритериальной оптимизации. Полученное решение указывает, что наибольшее влияние на производительность процесса и сплошность покрытия в области компромиссных режимов оказывает плотность разрядного тока. При этом высокая сплошность покрытия достигается при одновременном увеличении плотности разрядного тока и окружной скорости обрабатываемой детали, что способствует более равномерному распределению интенсивно наносимой массы ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность. Определены предпочтительные технологические режимы процесса МЭУ по обобщенному критерию оптимальности.

**Ключевые слова:** магнитная индукция, плотность разрядного тока, рабочий зазор, ферромагнитный порошок, математическое моделирование, сплошность покрытия

**Для цитирования:** Акулович, Л. М. Оптимизация технологических факторов магнитно-электрического упрочнения / Л. М. Акулович, А. В. Миранович, М. М. Дечко // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 404–412. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-404-412>

**Leonid M. Akulovich, Alexey V. Miranovich, Mikhail M. Dechko**

*Belarus State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

### **OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL FACTORS OF MAGNETIC-ELECTRIC STRENGTHENING**

**Abstract.** In order to determine the optimal values of technological factors for electromagnetic hardening process (EMHP), an experimental study of the process of applying ferromagnetic Fe – 2 % V powder coating on 30XGS (GOST 4543-71) steel parts was conducted. The process productivity and coating continuity were selected as the target parameters for the EMHP optimization. By applying the experimental design method, based on 5-factor central composite rotatable uniform plan, we have created stochastic models, expressed in regression functions of the second order. It has been determined that the magnetic induction value in the working gap is the most significant technological factor, affecting both target parameters. With the increasing induction magnitude the process productivity and the coating continuity increase non-linearly until the

maximum limit value, which was attributed to the forming of current-conductive chains in the working gap, that have varying electrical conductivity and different directions relative to the lines of magnetic field forces. In order to determine the optimal EMHP mode we have solved the problems of finding maximums for greatest productivity and coating continuity within the constraints of the studied factor range. The discovered EMHP-modes, optimal for each separate parameter, coincide only in the value of the magnetic induction and the discharge density. The optimal values for the other control factors belong to different areas of factor range for different optimization parameters. To determine the EMHP modes, balanced against the both parameters, the problem of multicriteria optimization was solved. The obtained solution reveals that the density of discharge currents produces the biggest impact on the process productivity and the coating continuity within the balanced modes. At the same time the high continuity of the coating is achieved by the supplementing increase of peripheral speed of the processed workpiece, which leads to evenner distribution of the intensively supplied mass of the ferromagnetic powder on the treated surface. The recommended technological modes of EMHP have been determined, based on the generalized optimality criteria.

**Keywords:** magnetic induction, discharge density, working gap, ferromagnetic powder, mathematical modelling, coating continuity

**For citation:** Akulovich L. M., Miranovich A. V., Dechko M. M. Optimization of technological factors of magnetic-electric strengthening. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 404–412 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-404-412>

**Введение.** Известно, что от свойств и состояния поверхностного слоя деталей, который наиболее подвержен внешним воздействиям, зависит надежность и ресурс работы машин и механизмов. Решающее влияние на формирование геометрических и физико-механических свойств поверхностей деталей оказывает технология их обработки [1–4]. Разнообразие условий работы машин и видов изнашивания деталей обусловило появление множества способов упрочнения изнашиваемых поверхностей, каждый из которых имеет свою рациональную область применения и не может претендовать на универсальность. Большими потенциальными возможностями обладают методы обработки металлов, основанные на использовании концентрированных потоков энергии, что практически исключает коробление деталей, вызванное температурными деформациями. Анализ таких методов по обобщенным параметрам показывает, что технологии магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) имеют ряд существенных достоинств [4–6]: не требуется специальной подготовки поверхности перед упрочнением, простота реализации электрических и магнитных потоков энергии, удобство автоматизированного управления. Вместе с тем для процесса МЭУ свойственна неравномерность распределения по упрочняемой поверхности вкраплений материала ферромагнитного порошка при воздействии на него электрических разрядов, что в зависимости от времени обработки приводит либо к снижению сплошности наносимого покрытия, либо к неэффективному использованию упрочняющего порошка.

Ранее проведенные исследования [4, 6, 7] по совершенствованию процесса МЭУ были направлены на интенсификацию нанесения покрытий путем генерирования электромагнитных полей, изменяющих величину силы прижима зерен ферромагнитного порошка к упрочняемой поверхности. Однако физическая связь производительности магнитно-электрического упрочнения и сплошности наносимого покрытия в настоящее время не установлена, поскольку равномерность распределения по поверхности зерен ферромагнитного порошка является следствием самоорганизации процесса при синергизме электромагнитных и кинематических факторов.

*Целью настоящего исследования* является определение значений технологических параметров МЭУ, обеспечивающих достижение высоких показателей качества поверхностей деталей наиболее производительным путем.

**Методика исследований.** При решении подобных задач, как правило, показатели качества и производительности являются конфликтующими параметрами, оптимальные значения которых достижимы при различных значениях управляющих факторов. Поэтому оптимизация технологического процесса требует поиска варианта, компромиссного по обоим критериям. Эффективной методологией решения этой проблемы является математическое моделирование, основанное на получении многофакторных уравнений, описывающих поведение технологического процесса, и его многокритериальная оптимизация с помощью построенной математической модели.

В качестве параметров оптимизации МЭУ приняты производительность процесса ( $Q$ , мг/мин) и сплошность покрытия (СП, %). Производительность магнитно-электрического упрочнения оценивалась по массе покрытия, нанесенного на упрочняемую поверхность, в единицу времени. Масса образцов измерялась до и после упрочнения на лабораторных весах ВЛА-200-2М с точностью до 0,001 г. Для определения сплошности покрытия на участках длиной 10 мм проводили

измерения длины поверхности с покрытием в продольном и поперечном направлениях на большом инструментальном микроскопе (БИМ-1Ц). Сплошность покрытия рассчитывали как отношение суммы длин с покрытием ко всей длине участка. Значение показателей для данных условий МЭУ определялось как среднее арифметическое результатов замеров на пяти образцах.

Ввиду высокой сложности описания физических процессов осаждения расплавляемых ферромагнитных частиц порошка в магнитном поле на поверхность металла и большого числа факторов, влияющих на эти процессы, исследование технологии магнитно-электрического упрочнения выполнено на основе стохастического подхода.

Экспериментальные исследования проводились на образцах из стали 30ХГС (ГОСТ 4543-71), представляющих собой кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм. Масса исходных образцов – 125 г. Образцы подвергались нормализации и обрабатывались до шероховатости поверхности  $Ra = 12,5$  мкм. Упрочнение поверхностей образцов с использованием ферромагнитного порошка Fe – 2 % V проводилось на экспериментальной установке модели УНП-1, смонтированной на токарно-винторезном станке модели 1Е61М.

На постоянных уровнях поддерживались следующие технологические факторы: размер частиц композиционного порошка  $\Delta = 240\text{--}320$  мкм; величина рабочего зазора  $\delta = 1,0$  мм; расход рабочей жидкости (СОЖ – 5%-ный раствор эмульсола Э2 в воде)  $q = 0,4 \cdot 10^{-3}$  дм<sup>3</sup>/(с · мм<sup>2</sup>).

Исходя из априорной информации, в качестве независимых управляющих факторов приняты технологические факторы, которые оказывают наибольшее влияние на показатели формирования упрочненного слоя (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Перечень управляющих технологических факторов и средств их измерения

T a b l e 1. The list of controlling technological factors and means for their measurement

Технологический фактор	Метод регулирования	Средство измерения	Точность фиксирования
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре, $B$ , Тл	Величиной тока в катушках электромагнитов	Измеритель магнитной индукции ИМИ-1	$\pm 1,5$ %
Плотность разрядного тока, $i$ , А/мм <sup>2</sup>	Изменение параметров электрических импульсов инверторного сварочного источника	Источник технологического тока Invertec V270 T	$\pm 2$ %
Удельная длительность упрочнения, $\tau$ , с/см <sup>2</sup>	Продольной подачей полюсного наконечника электромагнита относительно упрочняемой поверхности	Секундомер	$\pm 0,05$ с/см <sup>2</sup>
Окружная скорость заготовки детали, $V$ , м/с	Настройкой токарно-винторезного станка мод. 1Е61М	Механический тахометр MVR RY-850	$\pm 0,02$ %
Подача ферромагнитного порошка, $q$ , г/с	Изменением величины напряжения электродвигателя вибратора	Весы аналитические ВЛА-200-2М	$\pm 1$ мг/с

Величину тока в катушках электромагнитов  $I_k$ , обеспечивающего заданное значение магнитной индукции  $B$ , определяли из зависимости  $B = f(I_k)$ , построенной по экспериментальным данным.

На основе анализа существующих вариантов и методов математического моделирования технологических процессов [8–11] установлено, что процесс МЭУ можно адекватно описать регрессионными уравнениями второго порядка. Для

Т а б л и ц а 2. Интервалы варьирования технологических факторов

T a b l e 2. Intervals of process factors variation

Уровень факторов	Технологические факторы				
	$B$ , Тл	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	$\tau$ , с/см <sup>2</sup>	$V$ , м/с	$q$ , г/с
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$
Основной (0)	0,60	1,80	2,50	0,06	0,17
Верхний (+1)	0,75	2,20	3,00	0,08	0,20
Нижний (–1)	0,45	1,40	2,00	0,04	0,14
Звездная точка (+ $\alpha$ )	0,90	2,60	3,50	0,10	0,23
Звездная точка (– $\alpha$ )	0,30	1,00	1,50	0,02	0,11

получения необходимых данных были реализованы опыты по матрице центрального композиционного ротатбельного равномерного плана экспериментов. Интервалы варьирования управляющих технологических факторов приведены в табл. 2. Результаты опытов и рассчитанные значения статистических критериев представлены в табл. 3.

Обработка результатов экспериментов выполнена по алгоритму шагового регрессионного анализа с последовательным исключением из уравнения регрессии коэффициен-

тов, статистически незначимых по критерию Стьюдента. Вычислительная процедура реализована в программе Mathcad.

**Результаты и их обсуждение.** В ходе исследования получены уравнения в нормированных координатах, определяющие зависимости  $Q$  и СП от управляющих технологических факторов:

$$Q = 224,61 + 6,43X_1 + 1,96X_2 - 1,89X_3 + 0,33X_4 + 1,76X_5 + 1,66X_1X_2 - 1,21X_1X_3 + 1,59X_1X_4 - 1,94X_1X_5 - 2,26X_2X_3 - 2,34X_2X_5 + 2,24X_3X_5 + 0,19X_4X_5 - 4,18X_1^2 - 0,78X_2^2 - 1,73X_3^2 - 0,26X_4^2 - 0,23X_5^2; \tag{1}$$

$$СП = 95,49 + 6,47X_1 + 2,58X_2 + 5,30X_3 + 3,25X_4 + 2,42X_5 + 0,95X_1X_2 - 1,40X_1X_3 + 2,80X_3X_4 - 0,98X_1X_5 - 0,70X_2X_3 - 0,53X_2X_5 + 0,73X_3X_5 - 2,53X_4X_5 - 2,11X_1^2 - 0,24X_2^2 - 1,66X_3^2 - 4,14X_4^2 - 1,61X_5^2. \tag{2}$$

Установлено, что регрессионные модели адекватны при 5%-ном уровне значимости по критерию Фишера (см. табл. 3).

Полученные математические стохастические модели процесса МЭУ позволяют установить характер и степень влияния технологических факторов на параметры оптимизации и определить оптимальные режимы нанесения упрочняющих покрытий.

Анализ коэффициентов регрессии показывает, что технологическим фактором, наиболее влияющим на оба параметра, является величина магнитной индукции в рабочем зазоре. С ее увеличением наиболее интенсивно возрастает и производительность процесса, и сплошность покрытия. Однако знак «минус» при квадрате этого фактора указывает, что с увеличением магнитной индукции в рабочем зазоре масса наносимого ферромагнитного порошка увеличивается до определенного значения. Такой характер зависимостей (1) и (2) можно объяснить тем, что величина магнитной индукции влияет не только на интенсивность образования цепочек-микроэлектродов из зерен упрочняющего ферромагнитного порошка, но и на электрическую проводимость этих токопроводящих цепочек.

При прохождении электрического тока по образовавшимся цепочкам последние можно рассматривать как проводники с током, находящиеся во внешнем магнитном поле. На элемент цепочки длиной  $\Delta l$  в рабочем зазоре действует сила

$$\Delta F = I B \Delta l,$$

где  $I$  – величина тока в цепочке,  $A$ ;  $B$  – величина магнитной индукции в рабочем зазоре, Тл.

**Таблица 3. Матрица планирования эксперимента, результаты опытов и их статистические оценки**

**Table 3. Experimental design matrix, results of experiments and their statistical estimates**

$B$ , Тл	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	$\tau$ , с/см <sup>2</sup>	$V$ , м/с	$q$ , г/с	Дубли	$Q$ мг/мин		СП, %	
						экспериментальное среднее	расчетное	экспериментальное среднее	расчетное
$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$					
-1	-1	-1	-1	1	5	213,8	214,0	68,4	67,9
1	-1	-1	-1	-1	5	219,2	219,4	72,6	72,3
-1	1	-1	-1	-1	5	216,6	216,6	66,6	66,1
1	1	-1	-1	1	5	226,0	226,0	91,4	91,1
-1	-1	1	-1	-1	5	205,4	205,5	79,4	79,4
1	-1	1	-1	1	5	221,6	221,7	99,8	100,0
-1	1	1	-1	1	5	213,2	213,0	90,6	90,6
1	1	1	-1	-1	5	220,8	220,7	92,2	92,4
-1	-1	-1	1	-1	5	204,0	203,9	78,4	77,6
1	-1	-1	1	1	5	223,2	223,1	91,4	90,8
-1	1	-1	1	1	5	212,2	212,3	78,8	78,6
1	1	-1	1	-1	5	239,2	239,3	99,0	99,0
-1	-1	1	1	1	5	219,6	219,5	86,0	85,6
1	-1	1	1	-1	5	216,8	216,7	91,8	91,6
-1	1	1	1	-1	5	203,2	203,3	88,0	88,2
1	1	1	1	1	5	223,8	223,9	100	100,4
-2	0	0	0	0	5	195,0	195,0	73,4	74,1
2	0	0	0	0	5	220,8	220,7	100	100,0
0	-2	0	0	0	5	217,6	217,6	88,4	89,4
0	2	0	0	0	5	225,4	225,4	100	99,7
0	0	-2	0	0	5	221,6	221,5	77,0	78,2
0	0	2	0	0	5	213,8	213,9	100	99,4
0	0	0	-2	0	5	223,0	222,9	72,2	72,4
0	0	0	2	0	5	224,2	224,2	85,0	85,4
0	0	0	0	-2	5	220,2	220,2	83,8	84,2
0	0	0	0	2	5	227,2	227,2	93,6	93,9
0	0	0	0	0	30	224,6	224,6	95,6	95,5
Дисперсия воспроизводимости						0,316		1,98	
Дисперсия адекватности						0,180		3,84	
Критерий Фишера	экспериментальный					1,75		1,94	
	критический					2,96		2,01	

где  $I$  – величина тока в цепочке,  $A$ ;  $B$  – величина магнитной индукции в рабочем зазоре, Тл.

Если цепочка располагается строго вдоль магнитных силовых линий, то сила  $\Delta F$  равна нулю. Однако в реальном процессе в рабочем зазоре одновременно формируется множество токопроводящих цепочек с различной электрической проводимостью, и некоторые из них могут иметь направление, не параллельное магнитным силовым линиям. В таком случае на зерна ферромагнитного порошка действуют силы  $\Delta F$  и силы взаимодействия токов в цепочках, которые с увеличением магнитной индукции способны разорвать цепочку до момента расплавления зерен. Этим можно объяснить наличие экстремума в зависимостях (1) и (2).

Влияние остальных факторов зависит от их сочетания ввиду значительного взаимовлияния, на что указывают коэффициенты взаимодействия факторов в уравнениях регрессии. Поэтому для определения наиболее предпочтительного режима МЭУ решены задачи поиска максимумов наибольшей производительности и сплошности покрытия в границах исследованного факторного пространства (табл. 4). Соответствующие математические модели имеют вид:

$$Q(X_1, \dots, X_5) \rightarrow \max \quad \text{и} \quad \text{СП}(X_1, \dots, X_5) \rightarrow \max \quad (3)$$

$$-2 \leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2 \quad -2 \leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2$$

Вычислительная процедура реализована в программе Mathcad с использованием библиотеки программного обеспечения оптимизации KNITRO 7.0 и мультистарта из 100 случайных точек факторного пространства с целью поиска всех возможных локальных экстремумов.

Найденные оптимальные по каждому отдельному параметру режимы МЭУ совпадают только по величине магнитной индукции и плотности разрядного тока. По другим управляющим факторам оптимальные значения лежат в разных областях факторного пространства, что наглядно отображается сечениями поверхностей отклика, представленными на рис. 1. При этом в области оптимальных по критерию производительности режимов достигается 100%-ная сплошность покрытия (рис. 1, *a, b*), а по критерию максимальной сплошности эти области расположены в противоположных сторонах исследованного факторного пространства (рис. 1, *c, d*). Прогнозируемые значения сплошности, превышающие 100 %, указывают на то, что при этих режимах в отдельных областях будет наноситься покрытие увеличенной толщины. Кроме того, режимы, оптимальные по критерию максимальной производительности, лежат на границах интервалов варьирования управляющих факторов, где по матрице плана эксперимента наблюдения отсутствовали, что может вызывать значительную погрешность прогнозирования вследствие экстраполяции в неисследованную область.

Т а б л и ц а 4. Значения технологических факторов процесса МЭУ, оптимальные по различным критериям

Table 4. Values of technological factors of EMH process optimized on different criteria

Технологический фактор в нормированных и натуральных координатах		Параметры оптимизации		
		$Q \rightarrow \max$	СП $\rightarrow \max$	$Q \rightarrow \max$ , СП = 100 %
Величина магнитной индукции в рабочем зазоре	$X_1$	2,000		2,000
	$B$ , Тл	0,9		0,9
Плотность разрядного тока	$X_2$	2,000		1,961
	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	2,60		2,58
Удельная длительность упрочнения	$X_3$	-2,000	1,105	-2,000
	$\tau$ , с/см <sup>2</sup>	1,5	3,05	1,5
Окружная скорость заготовки	$X_4$	2,000	-0,488	2,000
	$V$ , м/с	0,10	0,05	0,10
Подача ферромагнитного порошка	$X_5$	-2,000	1,660	-2,000
	$q$ , г/с	0,11	0,22	0,11
Производительность процесса	$Q$ , мг/мин	265,8±1,7	206,6±1,1	265,3±1,7
Сплошность покрытия	СП, %	100,2±4,2	110,6±2,7	100±4,1



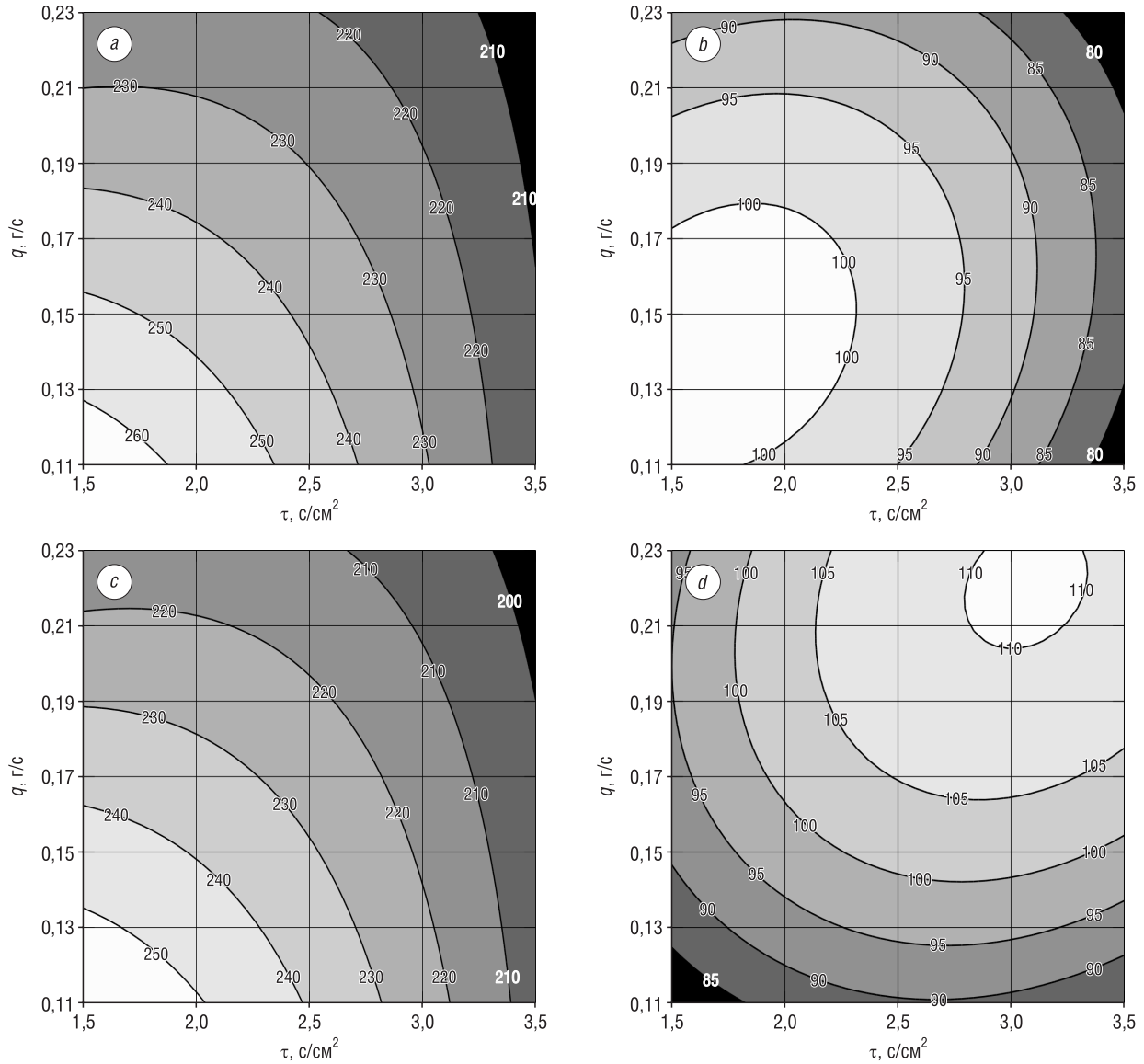


Рис. 1. Линии равных уровней производительности процесса  $Q$ , мг/мин ( $a, c$ ), и сплошности покрытия СП, % ( $b, d$ ), МЭУ в зависимости от удельной длительности упрочнения  $\tau$ , с/см<sup>2</sup>, и подачи ферромагнитного порошка  $q$ , г/с при оптимальных режимах по критериям максимальной производительности ( $a, b$ ) или максимальной сплошности покрытия ( $c, d$ )

Fig. 1. Contour plot of process productivity  $Q$ , mg/min ( $a, c$ ), and coating continuity CC, % ( $b, d$ ), МЭУ depending on specific duration of hardening  $\tau$ , s/cm<sup>2</sup>, and ferromagnetic powder supply  $q$ , g/s, when using optimal modes for the criteria of maximized productivity ( $a, b$ ) or maximized continuity of coating ( $c, d$ )

Для поиска компромиссного по обоим критериям решения были рассчитаны режимы МЭУ по следующей математической модели (см. табл. 4):

$$\begin{aligned}
 & Q(X_1, \dots, X_5) \rightarrow \max, \\
 & \text{СП}(X_1, \dots, X_5) = 100 \%, \\
 & -2 \leq (X_1, \dots, X_5) \leq 2.
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

Полученное решение в геометрическом виде показано на рис. 2, из которого следует, что существенное влияние на производительность процесса и сплошность покрытия в области компромиссных режимов оказывает плотность разрядного тока. При увеличении плотности разрядного тока происходит преобразование электрической энергии в тепловую и обеспечивается интенсивный нагрев и плавление зерен ферромагнитного порошка, расположенных

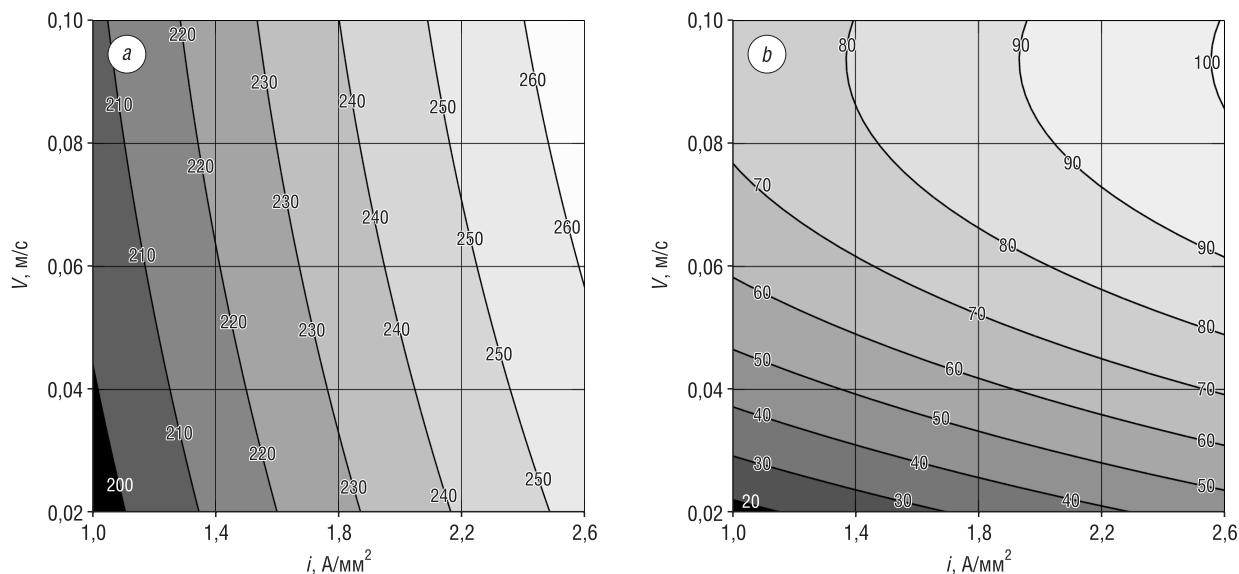


Рис. 2. Линии равных уровней производительности процесса  $Q$ , мг/мин (а), и сплошности покрытия СП, % (б), МЭУ в зависимости от плотности разрядного тока  $i$ , А/мм<sup>2</sup>, и окружной скорости заготовки  $V$ , м/с, при оптимальных режимах по компромиссному критерию (4)

Fig. 2. Contour plot of process productivity  $Q$ , mg/min (a), and coating continuity CC, % (b), depending on the discharge density  $i$ , A/mm<sup>2</sup>, and peripheral speed  $V$ , m/s, when using the optimal modes for the balanced criterion (4)

в цепочках-микроэлектродах. В результате возрастают производительность процесса нанесения упрочняющего покрытия. При этом высокая сплошность покрытия достигается при одновременном увеличении окружной скорости заготовки (см. рис. 2, б), которая способствует более равномерному распределению интенсивно наносимой массы ферромагнитного порошка на обрабатываемую поверхность.

**Заключение.** В результате экспериментального исследования получены стохастические модели в виде 5-факторных регрессионных уравнений второго порядка, адекватно описывающие зависимости производительности процесса упрочнения и сплошности формируемых покрытий из ферромагнитного порошка Fe – 2 % V на поверхностях образцов из стали 30ХГС (ГОСТ 4543-71) от технологических факторов МЭУ.

Полученные модели показывают, что влияние технологических факторов на параметры оптимизации нелинейно и не однозначно, так как зависит от их сочетания, на что указывают коэффициенты взаимодействия факторов в уравнениях регрессии.

Выявлено, что наибольшее влияние на производительность процесса МЭУ и сплошность формируемого покрытия оказывает величина магнитной индукции в рабочем зазоре. Анализ полученных зависимостей с экстремумами показывает, что с увеличением магнитной индукции наиболее интенсивно возрастает сплошность покрытия и повышается до определенного значения производительность процесса упрочнения. Такой характер изменения исследуемых параметров объясняется одновременным формированием множества токопроводящих цепочек-микроэлектродов с различной электрической проводимостью, некоторые из которых имеют направление, не параллельное магнитным силовым линиям в рабочем зазоре. При этом происходит разрыв цепочек-микроэлектродов до момента начала расплавления зерен ферромагнитного порошка в результате одновременного разнонаправленного действия сил магнитного поля на них, а также взаимодействия токов в цепочках и увеличения магнитной индукции в рабочем зазоре.

Выявлено, что при увеличении плотности разрядного тока происходит преобразование электрической энергии в тепловую, обеспечиваются стабильные нагрев и плавление устойчиво расположенных цепочек-микроэлектродов в рабочем зазоре. В результате возрастает производительность процесса упрочнения и износостойкость покрытий. При этом высокая сплошность покрытия достигается при одновременном увеличении окружной скорости заготовки, которая

способствует более равномерному распределению интенсивно наносимой массы ферромагнитного порошка на упрочняемую поверхность.

Определены оптимальные технологические режимы процесса магнитно-электрического упрочнения по различным критериям оптимальности.

### Список использованных источников

1. Соколов, И. О. Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением / И. О. Соколов, Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода. – Барановичи: РИО БарГУ, 2012. – 183 с.
2. Перемитько, В. В. Оптимизация режимов дуговой наплавки под флюсом по слою легирующей шихты деталей ходовой части гусеничных машин / В. В. Перемитько, Д. Г. Носов // Автоматическая сварка. – 2015. – № 5–6. – С. 49–52.
3. Водин, Д. В. Магнитно-импульсная обработка как перспективный метод повышения износостойкости металлорежущего инструмента / Д. В. Водин // Технические науки: проблемы и перспективы: материалы III Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, июль 2015 г.). – СПб.: Свое издательство, 2015. – С. 67–70.
4. Акулович, Л. М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л. М. Акулович, А. В. Миранович. – Минск: БГАТУ, 2016. – 236 с.
5. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Минск: ФТИ НАН Беларуси, 1997. – 416 с.
6. Ракомсин, А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А. П. Ракомсин; под общ. ред. П. А. Витязя. – Минск: Парадокс, 2000. – 201 с.
7. Федосенко А. С. Оптимизация условий получения механически легированных композиционных порошковых материалов для напыления износостойких плазменных покрытий / А. С. Федосенко, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2016. – № 3 (52). – С. 107–120.
8. Лавров, В. В. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента / В. В. Лавров, Н. А. Спирин. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2004. – 257 с.
9. Seber, G. A. F. Linear Regression Analysis / G. A. F. Seber, A. J. Lee. – Hoboken, New Jersey: Wiley, 2012. – 458 p.
10. Miller, S. H. Experimental design and statistics / S. H. Miller. – London: Routledge, 2015. – 186 p.
11. Производительность и качество наплавки при коаксиальной подаче лазерного излучения и газопорошковой смеси (струи) / К. Занга [и др.] // Электронная обработка материалов. – 2015. – № 51 (4). – С. 34–41.

### References

1. Sokorov I. O., Spiridonov N. V., Neroda M. V. *Technology of Strengthening of Heavy-Loaded Parts by Gas-Thermal Spraying*. Baranovich, Editorial Publishing Department of Baranovich State University, 2012. 183 p. (in Russian).
2. Peremitko V. V., Nosov D. G. Optimization of flux-core arc welding along the layer of alloying charge of caterpillar machine running gear parts. *Avtomaticheskaya svarka = Automatic Welding*, 2015, no. 5–6, pp. 49–52 (in Russian).
3. Vodin D. V. Magnetic pulse processing as an innovative method for increasing wear resistance of the metal cutting tool. *Tekhnicheskie nauki: problemy i perspektivy: materialy III Mezhdunar. nauch. konf. (g. Sankt-Peterburg, iyul' 2015 g.)* [Technical Sciences: Proceedings of the III International Scientific Conference (St. Petersburg, July 2015)]. St. Petersburg, 2015, pp. 67–70 (in Russian).
4. Akulovich L. M., Miranovich A. V. *Magnetic-Electric Strengthening of the Surfaces of Agricultural Machinery Parts*. Minsk, Belarus State Agrarian Technical University, 2016. 236 p. (in Russian).
5. Yashcheritsyn P. I., Kozhuro L. M., Rakomsin A. P., Sergeev L. E., Sidorenko M. I. *Process Fundamentals of Part Processing in Magnetic Field*. Minsk, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, 1997. 416 p. (in Russian).
6. Rakomsin A. P. *Strengthening and Restoration of Parts in Electromagnetic Field*. Minsk, Paradox Publ., 2000. 201 p. (in Russian).
7. Fedosenko A. S., Lovshenko G. F., Lovshenko F. G. Optimization of the production of mechanically alloyed composite powder materials for wear-resistant sprayed plasma coatings. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2016, no. 3(52), pp. 107–120 (in Russian).
8. Lavrov V. V., Spirin N. A. *Methods for Engineering Experiment Design and Evaluation*. Ekaterinburg, Ural State Technical University – UPI, 2004. 257 p. (in Russian).
9. Seber G. A. F., Lee A. J. *Linear Regression Analysis*. Hoboken, New Jersey, Wiley, 2012. 458 p.
10. Miller S. H. *Experimental Design and Statistics*. London, Routledge, 2015. 186 p.
11. Zang K., Yao D., Kovalenko V. S., Anyakin N., I., Kondrashev P. V., Zhuk P. O., Stepura A. N. Efficiency and quality of build-up when using coaxial supply of laser radiation and gas-powder mixture (jets). *Elektronnaya obrabotka materialov = Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2015, no. 51 (4), pp. 34–41 (in Russian).

### Информация об авторах

*Акулович Леонид Михайлович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологии металлов, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99/2, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

*Миранович Алексей Валерьевич* – кандидат технических наук, декан факультета технического сервиса в АПК, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99/2, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dekanatfts@yandex.by

*Дечко Михаил Михайлович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры моделирования и проектирования, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99/2, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: mdechko@rambler.ru

### Information about the authors

*Leonid M. Akulovich* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department Metal Technologies, Belarus State Agrarian Technical University (99/2, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: leo-akulovich@yandex.ru

*Alexey V. Miranovich* – Ph. D. (Engineering), Dean of the Farm Machinery Service Faculty, Belarus State Agrarian Technical University (99/2, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dekanatfts@yandex.by

*Mikhail M. Dechko* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department Simulation and Design, Belarus State Agrarian Technical University (99/2, Nezavisimosti Ave., 220023, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: mdechko@rambler.ru

ISSN 1561-8358 (print)

ISSN 2524-244X (online)

УДК 53.096:536.764

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-413-421>

Поступила в редакцию 22.07.2020

Received 22.07.2020

*К 45-ЛЕТИЮ ИНСТИТУТА ТЕХНИЧЕСКОЙ АКУСТИКИ  
НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ*

**О. А. Петрова-Буркина<sup>1</sup>, В. В. Рубаник, мл.<sup>1</sup>, В. В. Рубаник<sup>1</sup>, Т. В. Гамзелева<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь*

**ВЛИЯНИЕ ТЕРМООБРАБОТКИ НА ВЕЛИЧИНУ ТЕРМОКИНЕТИЧЕСКОЙ ЭДС  
ПРИ ОБРАТНОМ ФАЗОВОМ ПЕРЕХОДЕ В НИКЕЛИДЕ ТИТАНА**

**Аннотация.** Определена зависимость термокинетической ЭДС при обратном фазовом переходе в никелиде титана состава, близкого к эквиатомному, от продолжительности и температуры отжига в интервале 400–800 °С. Термокинетическую ЭДС измеряли прямым способом с помощью цифрового милливольтметра МНИПИ В7-72. Анализ фазового, элементного состава сплава и кинетику термоупругих фазовых превращений проводили на основании результатов рентгеноструктурных и калориметрических исследований, микрорентгеноспектрального анализа. Установлено, что отжиг при температуре 500 и 800 °С приводит к росту термокинетической ЭДС от 0,22 до 0,25 мВ. Удаление оксидного слоя с поверхности образца после отжига при 700 °С в течение 0,5 ч приводит к росту величины термокинетической ЭДС в первом термоцикле от 0,22 до 0,26 мВ. Термоциклирование образцов без оксидного слоя вызывает уменьшение термокинетической ЭДС за 20 термоциклов до 0,98 мВ, а при наличии оксидного слоя – до 0,3 мВ. Увеличение времени отжига при 700 °С до 20 ч приводит к снижению термокинетической ЭДС до 0,16 мВ. Величина термокинетической ЭДС после термообработки связана с изменением физико-механических свойств сплава и характеризуется смещением характеристических температур фазового перехода. Результаты исследований важны для понимания физики протекания термоэлектрических явлений в сплавах с эффектом памяти формы при нестационарном нагреве и могут быть использованы как для контроля однородности их физико-механических свойств, так и при проектировании исполнительных элементов, интеллектуальных датчиков и механизмов систем управления.

**Ключевые слова:** память формы, никелид титана, термокинетическая ЭДС, мартенситные превращения, фазовый переход, отжиг, оксидный слой

**Для цитирования:** Влияние термообработки на величину термокинетической ЭДС при обратном фазовом переходе в никелиде титана / О. А. Петрова-Буркина [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 413–421. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-413-421>

*TO THE 45<sup>TH</sup> ANNIVERSARY OF THE INSTITUTE OF TECHNICAL ACOUSTICS  
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS*

**Olga A. Petrova-Burkina<sup>1</sup>, Vasili V. Rubanik Jr.<sup>1</sup>, Vasili V. Rubanik<sup>1</sup>, Tat'jana V. Gamzeleva<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus*

**INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THERMOKINETIC EMF DURING REVERSE PHASE TRANSITION  
IN TITANIUM NICKELIDE**

**Abstract.** The effect of duration and annealing temperature in the range of 400–800 °С on the thermokinetic EMF value in titanium nickelide, the composition of which is close to the equi-atomic one, at a reverse phase transition was investigated. Thermokinetic EMF was measured directly using a digital millivoltmeter MNIPI V7-72. The phase and elemental composition of the alloy and the kinetics of thermoelastic phase transformations have been checked by X-ray diffraction and calorimetric studies, and X-ray microanalysis. Annealing at temperatures of 500 and 800 °С leads to an increase in the

thermokinetic EMF value from 0.22 to 0.25 mV. Removal of the oxide layer from the sample surface annealed at 700 °C for 0.5 h leads to an increase in the thermokinetic EMF value from 0.22 to 0.26 mV for the 1-st thermal cycle. It was found that thermal cycling causes a decrease in the thermokinetic EMF values down to 0.98 mV for the 20th thermal cycle for the samples without an oxide layer and to 0.3 mV for the samples with an oxide layer, respectively. With the increase in annealing time up to 20 h at 700 °C, the decrease in the thermokinetic emf value to 0.16 mV was observed. The thermokinetic EMF value after heat treatment is associated with changes in the physical and mechanical properties of the alloy and characterized by a shift of the characteristic temperatures of the phase transition. The research results are important for understanding the physics of thermoelectric phenomena in shape memory alloys during nonstationary heating and can be used both to control the homogeneity of their physical and mechanical properties and to design smart actuators and sensors, mechanisms of control systems.

**Keywords:** shape memory, titanium nickelide, thermokinetic EMF, martensitic transformations, phase transition, annealing, oxide layer

**For citation:** Petrova-Burkina O. A., Rubanik V. V., Jr., Rubanik V. V., Gamzeleva T. V. Influence of heat treatment on thermokinetic EMF during reverse phase transition in titanium nickelide. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 413–421 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-413-421>

**Введение.** Сплавы с памятью формы на основе никелида титана широко используются в качестве функциональных материалов, обладающих уникальным комплексом свойств. Сфера их применения чрезвычайно широка – от медицинских имплантатов до интеллектуальных конструкций космической техники [1]. Ранее установлена возможность наведения термокинетической ЭДС в никелиде титана при реализации термоупругих фазовых превращений. Иницирование таких превращений возможно при перемещении локального участка нагрева или охлаждения вдоль проводника [2–4]. При этом при нагреве в локальной зоне проводника должен происходить обратный фазовый переход мартенсита в аустенит ( $M \rightarrow A$ ), а при охлаждении – прямой ( $A \rightarrow M$ ). Установлено также, что величина термокинетической ЭДС при обратном фазовом превращении зависит от деформационного состояния и температуры в области нагрева, количества термоциклов в интервале температур превращений [2, 3, 5, 6], что, в свою очередь, приводит к изменениям характеристических температур и последовательности мартенситных превращений.

Известно, что термическая обработка сплавов никелида титана в значительной степени влияет на характеристические температуры и кинетику мартенситных превращений [7]. При термообработке на воздухе в результате взаимодействия с кислородом на поверхности никелида титана образуется оксидный слой, химический состав которого зависит от режимов термообработки (температуры отжига, времени отжига, режим закалки) и который по своим физико-механическим свойствам отличается от никелида титана, а также влияет на кинетику мартенситных превращений [8–10]. Поэтому *целью данной работы* являлось исследование влияния температуры и длительности отжига на величину термокинетической ЭДС при реализации обратного фазового превращения в локальной области нагрева никелида титана.

**Оборудование и методика исследования.** В качестве объекта исследований нами выбраны проволоочные образцы из никелида титана Ti – 50 ат.% Ni длиной 0,4 м и диаметром 0,6 мм, изготовленные в ООО «Промышленный центр МАТЭК-СПФ» (г. Москва, Россия) по стандартной заводской технологии [11]. Выбор материала обусловлен тем, что в нем температура окончания обратного фазового перехода из мартенсита в аустенит  $A_k$  не превышает 100 °C, а при комнатной температуре материал находится в «низкотемпературном» мартенситном состоянии.

Для изучения термокинетической ЭДС использовали прямой способ измерения цифровым милливольтметром МНИПИ В7-72. Испытания проводили на экспериментальной установке, конструкция которой позволяет перемещать область нагрева по образцу с заданной скоростью. Места контакта с подводными проводами термоизолировали. Температуру на поверхности образца контролировали тепловизором с точностью  $\pm 2$  °C. Предварительно производили чернение поверхности проволоки. Рабочая длина образца, по которой перемещали область нагрева, составляла 30 см. В процессе измерений скорость перемещения области нагрева поддерживали 0,4 см/с, максимальная температура проволоки в зоне нагрева составляла 100 °C, что выше температуры окончания обратного фазового перехода в изучаемом материале из мартенсита в аустенит ( $A_k$ ).

Исследование влияния температуры отжига на величину наводимой термокинетической ЭДС осуществляли после отжига в интервале температур 400–800 °С с шагом 50 °С в печи в течение 0,5 ч на воздухе. Для установления влияния оксидного слоя на значение термокинетической ЭДС был выбран рекристаллизационный отжиг при 700 °С в течение 0,5 ч, как наиболее часто используемый при производстве изделий из этого сплава и позволяющий обеспечить полную гомогенизацию структуры сплава после различных технологических операций при изготовлении проволоки [1, 12]. Для снятия с поверхности оксидного слоя после отжига применяли химическое травление в растворе  $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O}_2$ . Длительность отжига 20 ч была выбрана исходя из того, что при таком режиме происходят наиболее существенные изменения структуры и толщины оксидного слоя [13].

Кинетику мартенситных превращений исследовали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на калориметре DSC822e (METTLER TOLEDO) при скоростях нагрева и охлаждения 10 °С/мин в режиме съемки, включающем нагрев и охлаждение в интервале температур фазового превращения 20–100 °С. По калориметрическим кривым определяли температуры окончания ( $A_k$ ,  $M_k$ ) и начала мартенситных переходов ( $A_n$ ,  $M_n$ ) методом пересечения касательных по стандарту ASTM F2004-00 (Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis: ASTM F2004-00, ASTM, 100 BarrHarbor Drive, West Conshohocken, PA, 19428).

Рентгеноструктурный анализ сплава проводили на дифрактометре ДРОН-2 в  $\text{FeK}_\alpha$ -излучении при комнатной температуре ~20 °С.

Элементный состав образцов Ti – 50 ат.% Ni определяли на сканирующем электронном микроскопе CamScan 4 с энергодисперсионным микрорентгеноспектральным анализатором INCA 350 фирмы Oxford Instruments.

**Результаты и их обсуждение.** Как видно на рис. 1, при температурах отжига ( $T_{\text{отж}}$ ) 500 и 800 °С наблюдается рост термокинетической ЭДС до 0,25 мВ. То есть при таких режимах термообработки происходят более существенные изменения физико-механических свойств сплава, обеспечивающих максимальные значения термокинетической ЭДС. В других случаях величина термокинетической ЭДС составляет порядка 0,22 мВ.

Известно, что в сплавах, близких к эквиатомному составу, наблюдается слабая зависимость температур мартенситных превращений от режимов термообработки, что обусловлено видом диаграммы состояния TiNi [1]. Исследования характеристических температур методом ДСК при различной температуре термообработки (рис. 2) показали, что фазовые переходы во всех случаях реализуются по схеме  $\text{B2} \leftrightarrow \text{B19}'$ . То есть высокотемпературная фаза (А) с объемноцентрированной кубической (ОЦК) решеткой, упорядоченной по типу CsCl (B2), при охлаждении через интервал температур  $M_n \div M_k$  переходит в низкотемпературную орторомбическую фазу (М) с моноклинными искажениями B19'. При повышении температуры в интервале  $A_n \div A_k$  реализуется обратное мартенситное превращение и происходит перестройка кристаллической решетки  $\text{B19}' \rightarrow \text{B2}$ . При этом наблюдается уменьшение характеристических температур фазового перехода после отжига при 500 °С. Отжиг при  $T_{\text{отж}} = 700\text{--}800$  °С приводит к расширению температурного интервала обратного фазового перехода  $\text{B19}' \rightarrow \text{B2}$ . В остальных случаях характеристические температуры изменяются незначительно.

Химическое травление образцов в растворе  $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 6\text{H}_2\text{O}_2$  после отжига при  $T_{\text{отж}} = 700$  °С в течение 0,5 ч позволяет увеличить термокинетическую ЭДС до 0,26 мВ (рис. 3), однако последующая термическая обработка в течение 0,5 ч на воздухе возвращает

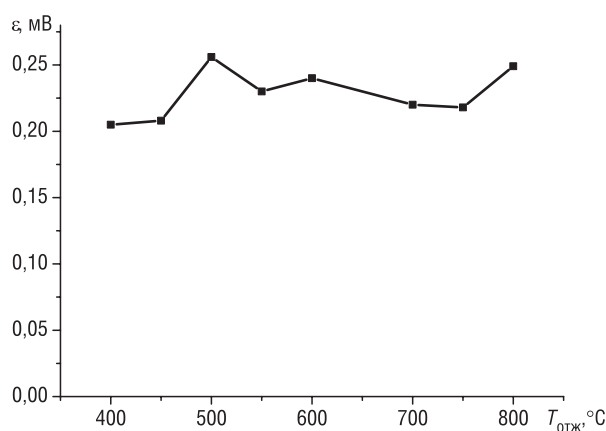


Рис. 1. Зависимость термокинетической ЭДС от температуры отжига образца Ti – 50 ат.% Ni

Fig. 1. Dependence of thermokinetic EMF of the Ti – 50 at.% Ni sample on the annealing temperature

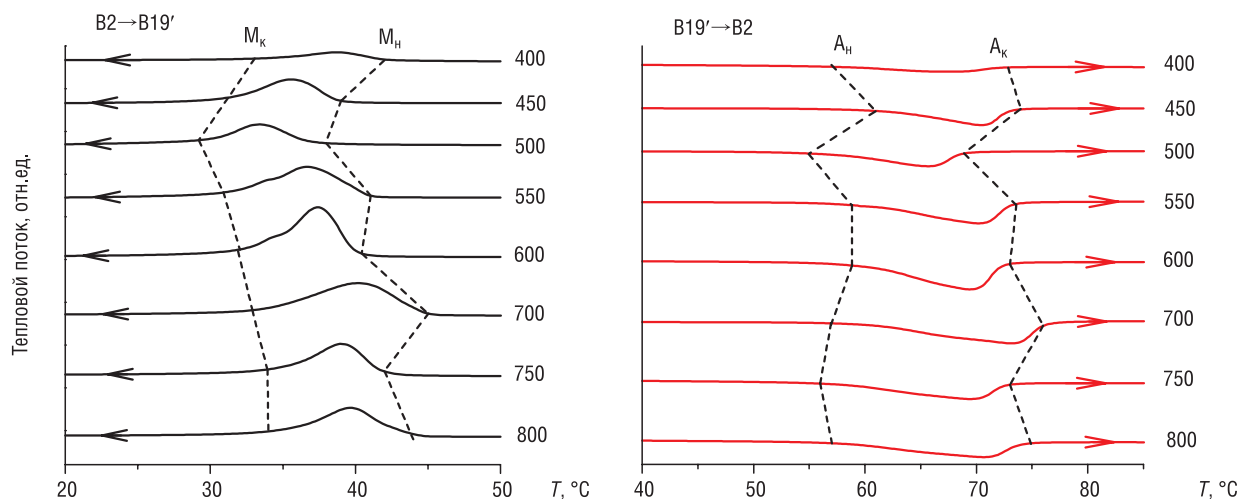


Рис. 2. Калориметрические кривые охлаждения (черный) и нагрева (красный) сплава Ti – 50 ат.% Ni после отжига в интервале температур 400–800 °C (указаны справа) в течение 0,5 ч

Fig. 2. Calorimetric curves of cooling (black) and heating (red) for the Ti – 50 at.% Ni alloy annealed in the temperature range of 400–800 °C (shown on the right side) for 0.5 h

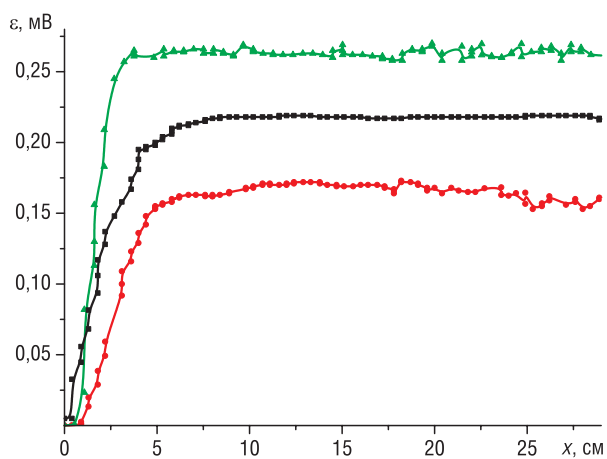


Рис. 3. Изменение термокинетической ЭДС в зависимости от местоположения области нагрева для образца Ti – 50 ат.% Ni после химического травления (зеленый), после отжига при температуре 700 °C в течение 0,5 ч (черный) и 20 ч (красный)

Fig. 3. Change of thermokinetic EMF depending on the location of the heating area for the Ti – 50 at.% Ni samples, chemically etched (green), annealed at 700 °C in 0.5 h (black) and for 20 h (red)

величину термокинетической ЭДС к 0,22 мВ. Отжиг в течение 20 ч на воздухе приводит к понижению ее величины до 0,16 мВ.

Как известно [1, 14, 15], сплавы эквимолярного состава чувствительны к фазовому наклепу – термоциклирование в интервале температур превращения, что связано с изменением их физико-механических свойств. Движение межфазной границы при термоциклировании сопровождается релаксацией пиковых напряжений путем пластического сдвига, что приводит к упрочнению матрицы и, как следствие, – к изменению характеристических температур превращений. При термоциклировании образца Ti – 50 ат.% Ni, подвергнутого химическому травлению после рекристаллизационного отжига при 700 °C в течение 0,5 ч, происходит снижение термокинетической ЭДС, так же как и в случае термоциклирования после отжига при температуре 700 °C в течение 0,5 ч (рис. 4). Однако в первом случае при термоциклировании в течение 20 термоциклов уменьшение значения термокинетической ЭДС не такое

интенсивное. После 1-го термоцикла наблюдается резкое падение термокинетической ЭДС до 0,21 мВ. Далее с ростом количества термоциклов термокинетическая ЭДС плавно уменьшается и в 20-м термоцикле составляет 0,98 мВ. Тогда как во втором случае, после отжига при температуре 700 °C в течение 0,5 ч, ее величина в 20-м термоцикле составляет 0,13 мВ.

Калориметрические исследования образцов после разных режимов термообработки показали (рис. 5), что фазовые переходы для всех режимов термообработки реализуются по схеме B2→B19'→B2. Химическое травление и отжиг в течение 20 ч уменьшают температуры начала A<sub>n</sub> и конца A<sub>k</sub> обратного фазового перехода B19'→B2. Химическое травление сужает также интервалы прямого B2→B19' фазового перехода.

Как известно [8–10], при термообработке в результате взаимодействия с воздухом на поверхности никелида титана образуется оксидный слой. При этом 80 % кислорода взаимодействует



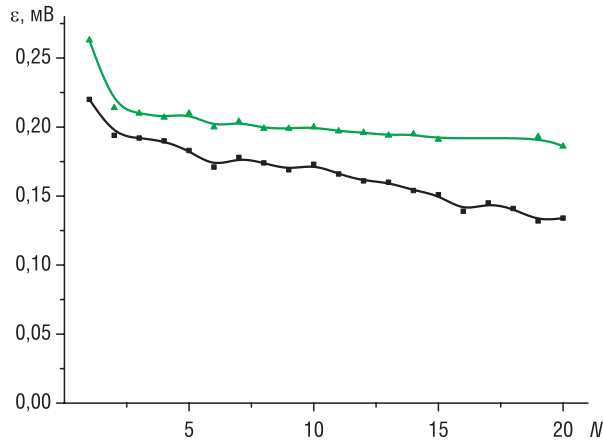


Рис. 4. Зависимость термокинетической ЭДС от количества термоциклов для образца Ti – 50 ат.% Ni после химического травления (зеленый) и после отжига при температуре 700 °C в течение 0,5 ч (черный)

Fig. 4. Dependence of thermokinetic EMF on the number of thermal cycles for the Ti – 50 at.% Ni samples, chemically etched (green) and annealed at 700 °C for 0.5 h (black)

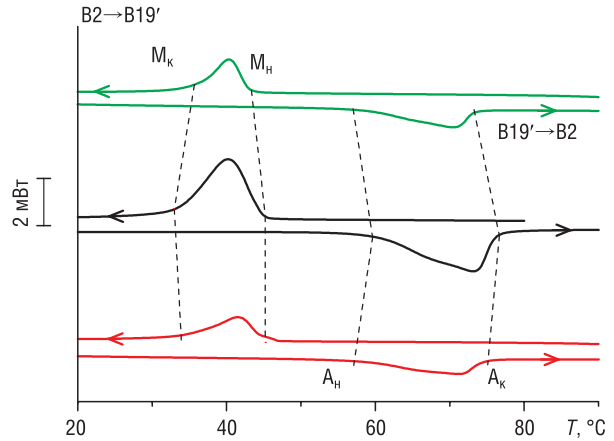


Рис. 5. Калориметрические кривые образцов Ti – 50 ат.% Ni после химического травления (зеленый), после отжига при температуре 700 °C в течение 0,5 ч (черный) и 20 ч (красный)

Fig. 5. Calorimetric curves for the Ti – 50 at.% Ni chemically etched samples (green), annealed at 700 °C for 0.5 h (black), and for 20 h (red)

с титаном и никелем с образованием оксидного слоя, а 20 % растворяется в материале. После высокотемпературного отжига при 700 °C состав зон, обогащенных титаном и никелем, практически однороден: наружный темный слой состоит преимущественно из диоксида титана  $TiO_2$  со структурой рутила, а светлый, граничащий с матрицей, – преимущественно из  $NiO$  с примесями состава  $TiO_2$  и  $Ti_3Ni$ . Рентгеноструктурные исследования показали (рис. 6), что на поверхности образцов присутствуют только окислы титана:  $TiO$ ,  $TiO_2$ ,  $Ti_4O_7$ ,  $Ti_2O_3$ ,  $Ti_{17}O_9$ . При этом более длительный отжиг приводит к увеличению количества и интенсивности пиков оксидов титана. После химического травления на поверхности образца еще наблюдаются пики диоксида титана  $TiO_2$  со структурой рутила.

В ходе изучения микроструктуры поперечного среза (рис. 7) образцов Ti – 50 ат.% Ni нами установлено, что высокотемпературный рекристаллизационный отжиг при 700 °C приводит к образованию оксидного слоя, который расслаивается на две зоны: темную приповерхностную и светлую, граничащую с матрицей. Однако после отжига в течение 0,5 ч темная зона оксидного слоя имеет неоднородную структуру. Распределение Ni и Ti в оксидном слое носит довольно хаотичный характер: на разных участках съемки на одинаковой глубине оксидного слоя содержание этих химических элементов значительно колеблется как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения концентрации. При повышении длительности отжига до 20 ч наблюдается четкое разделение распределения Ti и Ni по глубине окисленного слоя. Толщина оксидного слоя в обоих случаях составляет примерно 18 мкм. Кривые распределения содержания Ni и Ti (рис. 8) в полной мере подтверждают

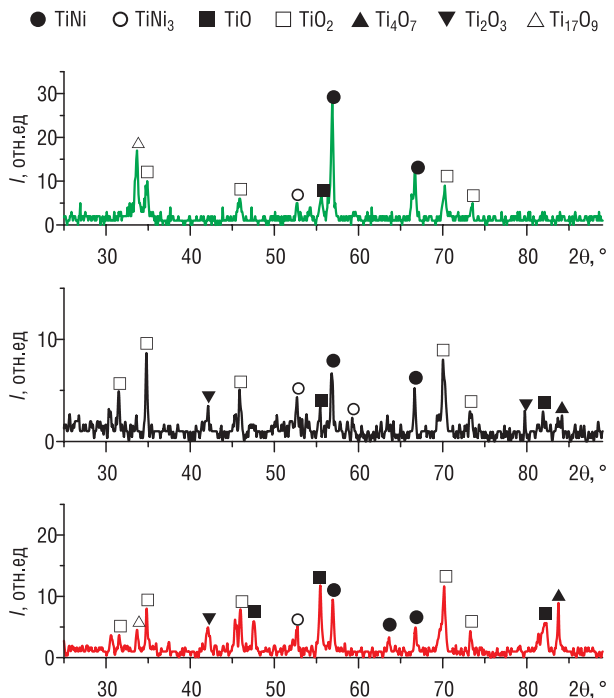


Рис. 6. Рентгенограммы сплава Ti – 50 ат.% Ni после химического травления (зеленый), после отжига при температуре 700 °C в течение 0,5 ч (черный) и 20 ч (красный)

Fig. 6. X-ray diffraction patterns of the Ti – 50 at.% Ni chemically etched samples (green) and annealed at 700 °C for 0.5 h (black), and for 20 h (red)

визуальную оценку содержания исследуемых элементов в оксидном слое. Темный слой обогащен титаном, а содержание никеля в этом слое приближается к нулю. Светлый слой, напротив, обогащен никелем, с увеличением продолжительности отжига до 20 ч его толщина увеличивается. В самой матрице после всех режимов отжига видны темные области, предположительно, обогащенные титаном (рис. 7).

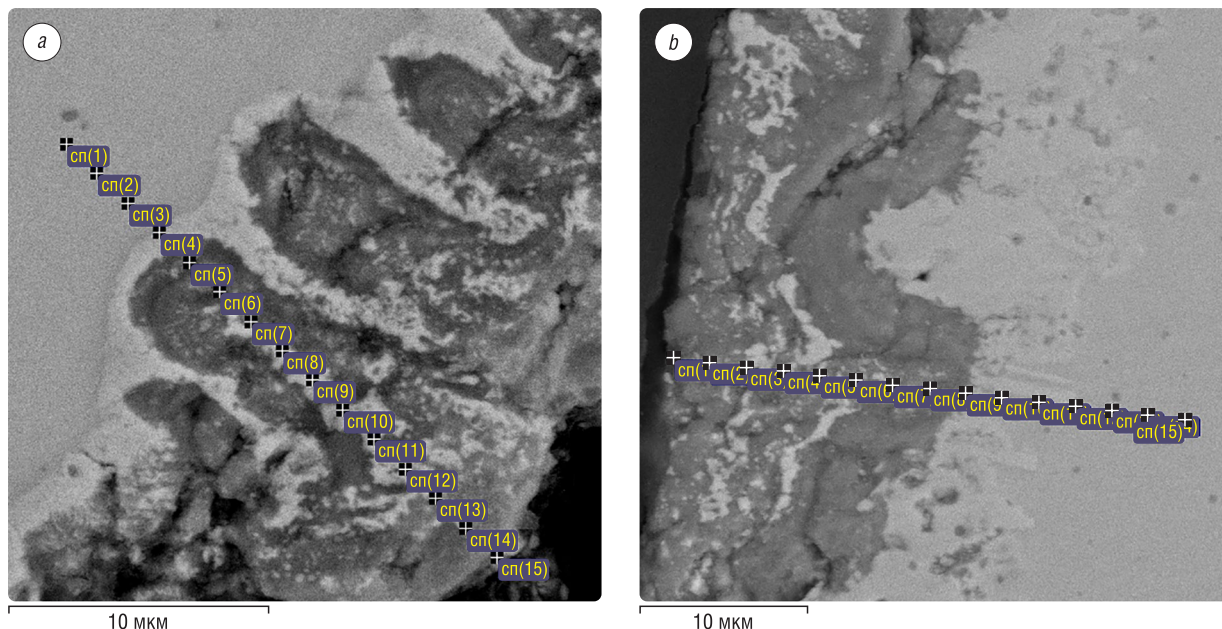


Рис. 7. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава Ti – 50 ат.% Ni после отжига при температуре 700 °C в течение 0,5 ч (a) и 20 ч (b)

Fig. 7. Electron microscopic image of the structure of the Ti – 50 at.% Ni alloy annealed at 700 °C for 0.5 h (a) and for 20 h (b)

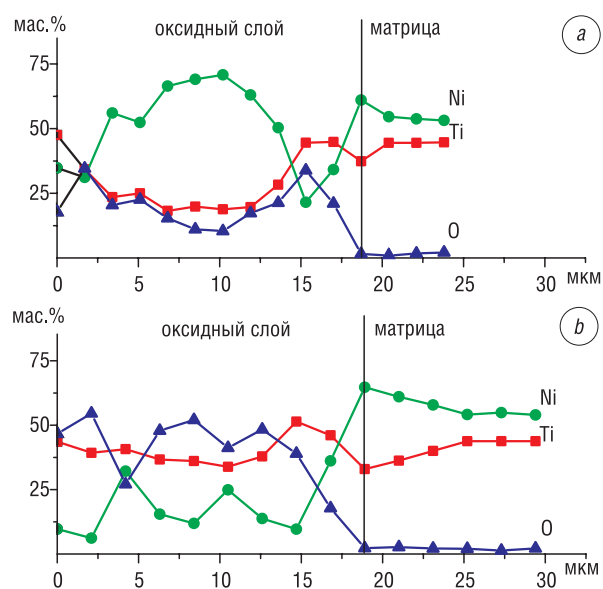


Рис. 8. Распределение химических элементов вблизи поверхности образца сплава Ti – 50 ат.% Ni после отжига при температуре 700 °C в течение 0,5 ч (a) и 20 ч (b) (точки на кривых соответствуют точкам спектрального анализа на рис. 7)

Fig. 8. Distribution of chemical elements near the surface of the Ti – 50 at.% Ni alloy sample annealed at 700 °C for 0.5 h (a) and for 20 h (b) (the points on the curves correspond to the points of spectral analysis in Fig. 7)

Спектральный микроанализ (рис. 9) подтверждает, что в матрице действительно присутствуют области, обогащенные титаном и никелем. Структура этих зон практически однородна: наружный темный слой состоит преимущественно из диоксида титана  $TiO_2$ , а светлый, граничащий с матрицей, – большей частью из  $NiO$  с примесями  $TiO_2$  и  $Ti_3Ni$ . То есть продолжительность отжига в Ti – 50 ат.% Ni влияет на структуру оксидного слоя.

**Заключение.** В ходе исследования нами установлено, что температура отжига в интервале 400–800 °C и его длительность влияют на величину наводимой термокинетической ЭДС в протяженном образце сплава Ti – 50 ат.% Ni. Ее рост до 0,25 мВ наблюдается при температуре отжига 500 и 800 °C. При отсутствии оксидного слоя термокинетическая ЭДС достигает значения 0,26 мВ. При длительном отжиге 700 °C в течение 20 ч, когда наружный темный слой образца состоит преимущественно из диоксида титана  $TiO_2$ , значение термокинетической ЭДС снижается до 0,16 мВ. Термоциклирование образцов после химиче-

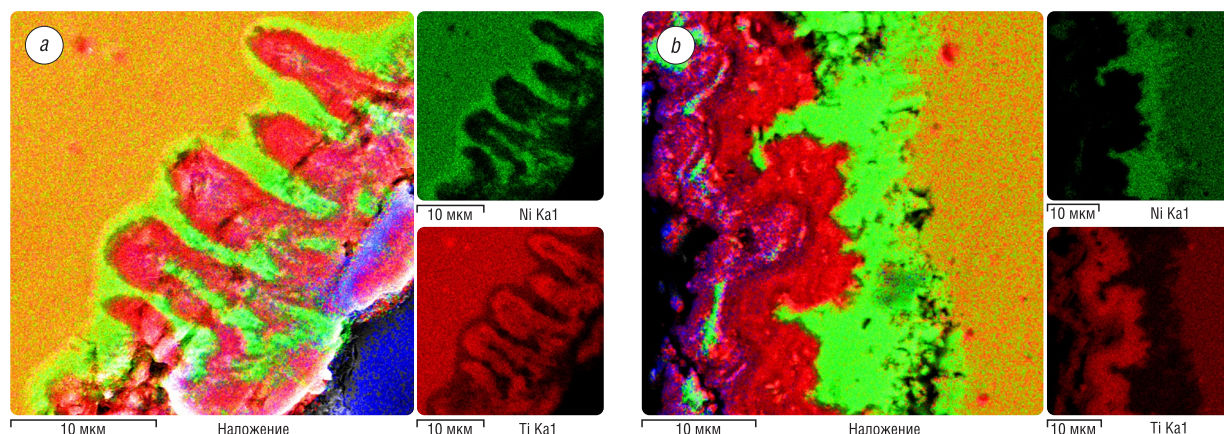


Рис. 9. Распределение никеля и титана в оксидном слое сплава Ti – 50 ат.% Ni после отжига при температуре 700 °С в течение 0,5 ч (а) и 20 ч (б). Снимки сделаны с тех же полей, что и на рис. 7

Fig. 9. Distribution of nickel and titanium in the oxide layer of the Ti – 50 at.% Ni alloy annealed at 700 °C for 0.5 h (a) and for 20 h (b). The photos were taken from the same fields as in Fig. 7

ского травления в течение 20 термоциклов приводит также к снижению термокинетической ЭДС до 0,98 мВ. Тогда как при термоциклировании после отжига при температуре 700 °С в течение 0,5 ч ее величина в 20-м термоцикле составляет 0,13 мВ.

Термоциклирование в интервале температур фазового превращения, температура и длительность термообработки, варьирование концентрации титана и никеля и структуры оксидного слоя приводят, в свою очередь, к изменению свойств никелида титана и термокинетической ЭДС, а также к смещению характеристических температур [1, 16].

Полученные результаты устанавливают зависимость наведенной термокинетической ЭДС в сплаве никелида титана от режимов термообработки, что позволяет более полно контролировать и изучать термоупругие превращения в этих материалах и может применяться для контроля однородности их физико-механических свойств. Также химическое травление и длительный отжиг возможно использовать как один из способов целенаправленного изменения термокинетической ЭДС на выбранных участках проволочных TiNi-изделий, что может найти практическое применение при проектировании интеллектуальных датчиков и различных исполнительных механизмов систем управления.

### Список использованных источников

1. Пушин, В.Г. Сплавы с памятью формы. Структура, фазовые превращения, свойства, применение / В.Г. Пушин, Л.И. Юрченко, Н.Н. Куранова // Труды школы-семинара «Фазовые и структурные превращения в сталях». – Магнитогорск, 2001. – Вып. 1: 20–24 ноября 2000 г., Магнитогорск. – С. 135–191.
2. Рубаник, В.В. Термокинетическая ЭДС в никелиде титана / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник мл., О.А. Петрова-Буркина // Материалы, технологии, инструменты. – 2012. – Т. 17, № 1. – С. 25–27.
3. Rubanik, V.V. Peculiarities of thermoelectric force behaviour in nikelidetitane upon non-stationary heating / V.V. Rubanik, V.V. Rubanik, Jr., O.A. Petrova-Burkina // Materials Science Forum. – 2013. – Vol. 738–739. – P. 292–296. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.292>
4. Rubanik, V.V. Thermokinetic EMF under direct phase transformation / V.V. Rubanik, A.V. Lesota, V.V. Rubanik, Jr. // Mater. Today Proc. Part B. – 2017. – Vol. 4, Iss. 3. – P. 4712–4716. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.04.057>
5. Rubanik, V.V. Thermokinetic EFM in nikelide titanium during reverse phase transformation / V.V. Rubanik, V.V. Rubanik, Jr., O.A. Petrova-Burkina // Shape Memory & Superelastic Technology (SMST-2019), Konstanz, Germany, May 13–17, 2019. – Konstanz, 2019. – P. 86–87.
6. Рубаник, В.В. Термокинетическая ЭДС в никелиде титана при обратном фазовом переходе / В.В. Рубаник, В.В. Рубаник, мл., О.А. Петрова-Буркина // Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии»: Брест, 27–31 мая 2019 г.: сб. ст. / под ред. В.В. Рубаника. – Витебск: ВГТУ, 2019. – С. 652–654.
7. Никелид титана: медицинский материал нового поколения / [В.Э. Гюнтер, В.Н. Ходоренко, Ю.Ф. Ясенчук и др.]; НИИ мед. материалов и имплантатов с памятью формы Сиб. физ.-техн. ин-та при Томском гос. ун-те. – Томск: [Изд-во МИЦ], 2006. – 296 с.
8. Surface oxidation of NiTi shape memory alloy / G.S. Firstov [et al.] // Biomaterials. – 2002. – Vol. 23, Iss. 24. – P. 4863–4871. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00244-2](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00244-2)

9. Исследование влияния состояния поверхности изделий из сплавов TiNi на параметры эффектов памяти формы / С. Д. Прокошкин [и др.] // *Металлы*. – 2009. – № 6. – С. 76–84.
10. Моногенов, А. Н. Влияние оксидного слоя в никелиде титана на параметры формоизменения / А. Н. Моногенов, М. А. Перепелкин, В. Э. Гюнтер // *Материалы с памятью формы и новые медицинские технологии* / под ред. В. Э. Гюнтера. – Томск, 2010. – С. 332–336.
11. Андреев, В. А. Разработка технологии производства и исследование функционально-механических свойств проволоки из сплавов TiNi с эффектом памяти формы: дис. ... канд. техн. наук: 05.16.01 / В. А. Андреев. – СПб., 2008. – 136 л.
12. Functional properties of nanocrystalline, submicrocrystalline and polygonized Ti–Ni alloys processed by cold rolling and post-deformation annealing / V. Brailovski [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2011. – Vol. 509, № 5. – P. 2066–2075. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.142>
13. Беляев, С. П. Исследование процессов окисления и сегрегации на поверхности никелида титана / С. П. Беляев, Ф. З. Гильмутдинов, О. М. Канунникова // *Письма в Журн. техн. физики*. – 1999. – Т. 25, вып. 13. – С. 89–94.
14. Uchil, J. Effect of thermal cycling on R-phase stability in a NiTi shape memory alloy / J. Uchil, K. G. Kumara, K. K. Mahesh // *Mater. Sci. Eng., A*. – 2002. – Vol. 332. – P. 25–28. <https://doi.org/10.1117/12.514736>
15. Variation in kinetics of martensitic transformation during partial thermal cycling of the TiNi alloy / S. Belyaev [et al.] // *Thermochim. Acta*. – 2014. – Vol. 582. – P. 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.03.002>
16. Lesota, A. V. Calculation of the effect of plastic deformation on thermo-kinetic electromotive force in TiNi alloy / A. V. Lesota, V. V. Rubanik, V. V. Rubanik Jr. // *Lett. Mater.* – 2018. – Vol. 8, № 4. – P. 401–405. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-4-401-405>

## References

1. Pushin V. G., Yurchenko L. I., Kuranova N. N. Alloys with shape memory. Structure, phase transformations, properties, application. *Trudy shkoly-seminara "Fazovye i strukturnye prevrashcheniya v stalyah"*. Вып. 1: 20–24 ноябрь 2000 г., Magnitogorsk [Proceedings of the School-Seminar "Phase and Structural Transformations in Steels". Issue 1: November 20–24, 2000, Magnitogorsk]. Magnitogorsk, 2001, pp. 135–191 (in Russian).
2. Rubanik V. V., Rubanik V. V., Jr., Petrova-Burkina O. A. Thermokinetic EMF in nikeliditane. *Materialy, tekhnologii, instrument = Materials, Technologies, Tools*, 2012, vol. 17, no. 1, pp. 25–27 (in Russian).
3. Rubanik V. V., Rubanik V. V., Jr., Petrova-Burkina O. A. Peculiarities of thermoelectric force behaviour in nikeliditane upon non-stationary heating. *Materials Science Forum*, 2013, vol. 738–739, pp. 292–296. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.738-739.292>
4. Rubanik V. V., Lesota A. V., Rubanik V. V., Jr. Thermokinetic EMF under direct phase transformation. *Materials Today Proceedings. Part B*, 2017, vol. 4, iss. 3, pp. 4712–4716. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.04.057>
5. Rubanik V. V., Rubanik V. V., Jr., Petrova-Burkina O. A. Thermokinetic EFM in nikelide titanium during reverse phase transformation. *Shape Memory & Superelastic Technology (SMST-2019). Konstanz, Germany, May 13–17, 2019*. Konstanz, 2019, pp. 86–87.
6. Rubanik V. V., Rubanik V. V., Jr., Petrova-Burkina O. A. Thermokinetic EMF in nikeliditane during reverse phase transition. *Mezhdunarodnyi simpozium "Perspektivnye materialy i tekhnologii": sbornik statei* [International Symposium "Perspective Materials and Technologies": Collection of Articles]. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 2019, pp. 652–654 (in Russian).
7. Gyunter V. E., Khodorenko V. N., Yasenichuk Yu. F., Chekalkin T. L. *Medical Materials and Implants with Form Memory*. Tomsk, 2006. 296 p. (in Russian).
8. Firstov G. S., Vitchev R. G., Kumar H., Blanpain B., Humbeeck J. Van. Surface oxidation of NiTi shape memory alloy. *Biomaterials*, 2002, vol. 23, iss. 24, pp. 4863–4871. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(02\)00244-2](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(02)00244-2)
9. Prokoshkin S. D., Ryklina E. P., Chernavina A. A., Abramov V. Ya., Krestnikov N. S. Investigation of the influence of the surface state of products made of tini alloys on the parameters of shape memory effects. *Metally = Metals*, 2009, no. 6, pp. 76–84 (in Russian).
10. Monogonov A. N., Perpelkin M. A., Gyunter V. E. Influence of the oxide layer in titanium nickelide on the parameters of shape change. Gyunter V. E., ed. *Materialy s pamyat'yu formy i novye medicinskie tekhnologii* [Materials with Shape Memory and New Medical Technologies]. Tomsk, 2010, pp. 332–336 (in Russian).
11. Andreev V. A. *Development of Production Technology and Research of Functional and Mechanical Properties of Wire Made of TiNi Alloys with the Effect of Shape Memory*. St. Petersburg, 2008. 136 p. (in Russian).
12. Brailovski V., Prokoshkin S., Inaekyan K., Demers V. Functional properties of nanocrystalline, submicrocrystalline and polygonized Ti–Ni alloys processed by cold rolling and post-deformation annealing. *Journal of Alloys and Compounds*, 2011, vol. 509, no. 5, pp. 2066–2075. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.10.142>
13. Belyaev S. P., Gil'mutdinov F. Z., Kanunnikova O. M. Investigation of oxidation and segregation processes on the surface of titanium nickelide. *Pis'ma v Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Technical Physics Letters*, 1999, vol. 25, iss. 13, pp. 89–94 (in Russian).
14. Uchil J., Kumara K. G., Mahesh K. K. Effect of thermal cycling on R-phase stability in a NiTi shape memory alloy. *Materials Science and Engineering, A*, 2002, vol. 332, pp. 25–28. <https://doi.org/10.1117/12.514736>
15. Belyaev S., Resnina N., Sibirev A., Lomakin I. Variation in kinetics of martensitic transformation during partial thermal cycling of the TiNi alloy. *Thermochimica Acta*, 2014, vol. 582, pp. 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2014.03.002>
16. Lesota A. V., Rubanik V. V., Rubanik V. V., Jr. Calculation of the effect of plastic deformation on thermo-kinetic electromotive force in TiNi alloy. *Letters on Materials*, 2018, vol. 8, no. 4, pp. 401–405. <https://doi.org/10.22226/2410-3535-2018-4-401-405>

### Информация об авторах

*Петрова-Буркина Ольга Александровна* – младший научный сотрудник, лаборатория физики металлов, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Генерала Лядникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: olchik.1987@mail.ru

*Рубаник Василий Васильевич, мл.* – доктор технических наук, доцент, директор, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Генерала Лядникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-9268-0167>. E-mail: jr@tut.by

*Рубаник Василий Васильевич* – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, заведующий лабораторией физики металлов, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Генерала Лядникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-0350-1180>. E-mail: v.v.rubanik@tut.by

*Гамзелева Татьяна Вадимовна* – научный сотрудник, лаборатория электронно-зондового анализа, Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: iscentr@tut.by

### Information about the authors

*Olga A. Petrova-Burkina* – Junior Researcher, Laboratory of Metal Physics, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Lyudnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: olchik.1987@mail.ru

*Vasili V. Rubanik, Jr.* – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Director, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Lyudnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-9268-0167>. E-mail: jr@tut.by

*Vasili V. Rubanik* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Head of the Laboratory of Metal Physics, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Lyudnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-0350-1180>. E-mail: v.v.rubanik@tut.by

*Tat'jana V. Gamzeleva* – Researcher, Laboratory of Electron Probe Analysis, O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: iscentr@tut.by

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

UDC 621.9.06+536.75  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-422-432>

Received 06.08.2020  
Поступила в редакцию 06.08.2020

**Boris M. Bazrov<sup>1</sup>, Mikhail L. Kheifetz<sup>2</sup>, Valery L. Hurevich<sup>3</sup>, Nikolay N. Popok<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic Belarus*

<sup>3</sup>*Belarussian State Institute of Metrology, Minsk, Republic Belarus*

<sup>4</sup>*Polotsk State University, Novopolotsk, Republic Belarus*

**ASSESSMENT OF PRODUCTION MANUFACTURABILITY OF THE DESIGN  
IN THE PRODUCT LIFE CYCLE**

**Abstract.** On the basis of technical and economic analysis of the properties of relations between design and technological solutions, a method for the integral assessment of production manufacturability by combining individual manufacturability coefficients at different stages of the product life cycle is suggested. Separate coefficients take into account the influence degree of various constituent stages on the labor intensity of production and maintenance, repair and disposal of the product structure. Design and technological solutions in design systems imply the use of properties such as reflexivity, symmetry and transitivity. As a result, it is proposed to understand the properties set of the product design that determine its adaptability to achieve optimal costs in production and disposal for specified quality indicators and work conditions. A list of manufacturability coefficients of manufacturing a product design has been determined, including coefficients of purchase, repeatability of details and connections, material hardness, borrowing, typing, precision, roughness, mass. An examination of the effectiveness assessment the use tools, equipment and other objects of the technological environment at the stages design and technological production preparation is formalized. The examination includes an analysis of the frequency and duration of the meeting of structural parts elements and the tools state at the stages of their manufacture, operation and disposal.

**Keywords:** production, disposal, design, product, part, manufacturability, coefficient, labor intensity

**For citation:** Bazrov B. M., Kheifetz M. L., Gurevich V. L., Popok N. N. Assessment of production manufacturability of the design in the product life cycle. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 422–432 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-422-432>

**Б. М. Базров<sup>1</sup>, М. Л. Хейфец<sup>2</sup>, В. Л. Гуревич<sup>3</sup>, Н. Н. Попок<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>*Институт машиноведения имени А. А. Благоднарова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация*

<sup>2</sup>*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

<sup>3</sup>*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

<sup>4</sup>*Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Республика Беларусь*

**ОЦЕНКА ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ КОНСТРУКЦИИ  
В ЖИЗНЕННОМ ЦИКЛЕ ИЗДЕЛИЯ**

**Аннотация.** На основе технико-экономического анализа свойств отношений конструкторско-технологических решений предложен метод интегральной оценки производственной технологичности путем объединения отдельных коэффициентов технологичности на различных этапах жизненного цикла изделия. Отдельные коэффициенты учитывают степень влияния различных составляющих этапов на трудоемкость производства и обслуживания, ремонта и утилизации конструкции изделия. Конструкторско-технологические решения в системах проектирования предполагают использование таких свойств, как рефлексивность, симметричность и транзитивность. В результате предложено под производственной технологичностью понимать совокупность свойств конструкции изделия, определяющих ее приспособленность к достижению оптимальных затрат при производстве и утилизации для заданных

показателей качества и условий выполнения работ. Определен перечень коэффициентов технологичности изготовления конструкции изделия, включающий коэффициенты покупаемости, повторяемости деталей и соединений, твердости материала, заимствования, типизации, точности, шероховатости, массы. Формализована экспертиза оценки эффективности применения инструментов, средств оснащения и других объектов технологической среды на стадиях конструкторской и технологической подготовки производства. Экспертиза включает анализ частоты и продолжительности встречи конструктивных элементов деталей и состояния инструментов на этапах их изготовления, эксплуатации и утилизации.

**Ключевые слова:** производство, утилизация, конструкция, изделие, деталь, технологичность, коэффициент, трудоемкость

**Для цитирования:** Оценка производственной технологичности конструкции в жизненном цикле изделия / Б.М. Базров [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 422–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-422-432>

**Introduction.** Determination and assessment of changes in the design of products, in technological and operational processes, in their disposal, as well as cost indicators and quality indicators of machines, taking into account their mutual influence, are hampered by the multi-connected nature of the interactions of the forming and transforming product [1, 2]. To develop a mathematical apparatus for analyzing the technical and economic efficiency of quality indicators and the cost of products, it is necessary to correctly reduce the dimension of the transformation of analyzed properties, which describes the problem [1, 3].

The correct solution to such a problem is facilitated by the replacement of objects set, interacting with the product, by one object – a technological or operational environment with a possible identity of the replacement results [2, 3]. Determination of the characteristics of a multiply connected environment allows, with known results of its interaction with the product, finding rational values of the quality indicators of the product and carrying out the directed formation of the technological environment [3].

To formalize the conditions for the purposeful creation of technological environments, each set of the system components of the same name is described as a set of design and technological solutions (DTS) [3, 4]. This approach allows any environment to be represented as a tuple, each element of which is an element of the corresponding set of DTS [5].

Due to the redundancy of the technological environment in terms of structural composition, it is advisable to use complex process criteria, that summarize the assessment of design and technological solutions by coefficients, that take into account their degree of influence on the technical and economic indicators of processes and their labor intensity, as an objective function instead of specific values of the set of selection criteria (determined by numerical coefficients) [5].

*The purpose of the work* is to justify the choice and application of an integrated method for assessing the manufacturability of a product design with specified quality parameters, based on the labor intensity of processes at the stages of its life cycle, and the formation of a set of criteria, that generalizes the assessment of design and technological solutions by coefficients that take into account their degree of influence on the technical and economic indicators of processes.

**Analysis of the relations properties for the choice of design and technological solutions.** We assume that if any two components of the system have at least one common property, then there is a connection between them in terms of common properties. This makes it possible to organize the choice of DTS by equivalence and preference [2]. By equivalence, dissimilar solutions are selected, which in terms of the totality of their properties must correspond to each other. According to preference, solutions are selected from the ones of the same name that have the best values of the required properties.

This approach makes it possible to formalize the conditions for choosing DTS for a specific value of the established selection criterion and makes it possible to choose a solution according to several criteria corresponding to various properties of DTS.

The adoption of DTS in design systems is traditionally based on the analysis of equivalence ( $x \equiv y$ ) and preference (non-strict  $x \leq y$  or strict  $x < y$ ) of solutions embedded in the knowledge base. Used properties [1, 6]:

*reflexivity* ( $x \equiv x$ ,  $x \leq x$  – true;  $x < x$  – false);

*symmetry* ( $x \equiv y \Rightarrow y \equiv x$  – true;  $x \leq y$  and  $y \leq x \Rightarrow x = y$  – antisymmetric;  $x < y$  and  $y < x \Rightarrow$  mutually exclusive – asymmetric);

*transitivity* ( $x \equiv y$  and  $y \equiv z \Rightarrow x \equiv z$ ,  $x \leq y$  and  $y \leq z \Rightarrow x \leq z$ ,  $x < y$  and  $y < z \Rightarrow x < z$  – true).

As a result, using the transitivity property, the most preferable of the previous solutions is compared with the new one proposed or selected from the knowledge base in terms of the symmetry properties of the quality parameters.

In the general case, different nonequivalent DTS are most preferable for different quality parameters from the required set of properties. In this case, it is necessary to use the dominant DTS ( $x \ll y$ ), characterized by the properties [1, 6]:

*antireflexivity* ( $x \ll x - \text{false}$ );

*asymmetry* ( $x \ll y$  and  $y \ll x \Rightarrow$  mutually exclusive);

*non-transitivity* ( $x \ll y$  and  $y \ll z \not\Rightarrow x \ll z$ ).

In the absence of symmetry and transitivity to determine the dominance of a parameter, it is advisable to apply a synergetic concept using the concept of a mode of a continuous random variable, which is understood as such a value of the parameter at which its distribution density has a maximum [2, 4].

According to the synergetic concept, stable modes adapt to the dominant unstable modes and, as a result, can be excluded. This leads to a sharp reduction in the number of controlled parameters – the degrees of freedom of the technical system. The remaining unstable modes can serve as order parameters that determine production processes [1, 7].

The distributions of the studied quantities, against which the modes appear, are mainly described by the laws [8]:

1) uniform  $f(x) = 1/(\mu_1 - \mu_0)$ , if  $\mu_0 \leq x \leq \mu_1$ ;

2) exponential  $f(x) = (1/\mu)\exp(-x/\mu)$ , if  $\mu > 0, x > 0$ ;

3) normal  $f(x) = (1/(\sigma\sqrt{2\pi}))\exp(-(x - \mu)^2/(2\sigma^2))$ , if  $\sigma > 0, -\infty < \mu < \infty, -\infty < x < \infty$  or other, where  $\mu$  – the mathematical expectation;  $\mu_0$  and  $\mu_1$  – restrictions;  $\sigma^2$  – variance of random variables  $x$ .

The Romanovsky's ratio allows judgement of the degree of statistical data correspondence to the chosen distribution law and on the nature of manifestation modes:

$$R = \frac{\lambda_p^2 - k}{\sqrt{2k}},$$

where  $\lambda_p^2$  – the Pearson's criterion;  $k$  – the number of freedom degrees, i.e. the groups number in studied series, calculated ( $\mu, \sigma$ , etc.) and used in calculating the theoretical distribution of statistical characteristics.

Statistical analysis of the production system characteristics within the framework of a wide range of applied technologies, equipment and means of equipment allows limitation of the range of objects and processes under consideration. When choosing the restrictions number for objects and processes, it is advisable to consider the conflicting requirements interdependence for the reliability and for flexibility of the production system. Ratio of reliability – stability and flexibility – adaptability can serve as a criterion for making DTS about the rational structure of the production system [9].

Flexibility and reliability in self-organizing systems can be controlled by changing the subsystems number [10]. Each subsystem has deterministic – well-defined, and fluctuating – scattered outputs.

It grows in proportion to the subsystem number  $n$  according to the central limit theorem with the additivity of the total output, while the scattering increases in proportion to the square root  $\sqrt{n}$ .

These assessments are based on a linear relationship analysis, but in fact the feedback inherent in manufacturing systems leads to even more significant suppression of the characteristics scatter [11].

When justifying the choice of DTS, it is necessary to take into account the cost of forming the parameters of the processing quality and to consider the mechanisms for controlling the technological process [2, 5].

**Manufacturability of design and stages of the product life cycle.** The manufacturability of a product design (MPD) has a great impact on the efficiency of the product life cycle stages – design, manufacture, operation, disposal (Technique for testing structures for manufacturability and assessing the level of mechanical engineering manufacturability and instrument-making products. Moscow, Publishing House of Standards, 1976. 56 p.). MPD should show how the product is adapted for operation, manufacture and disposal [12–15].

The separation of MPD into operational and production manufacturability is based on the separation of the nature of the work, performed at these stages. If we compare the types of work, performed at the stages of production and disposal, it can be noted that the same technologies are used. For example,



when cutting blanks and disposing of parts, the same technological methods are used; in the manufacture of a product design (PD), in some cases, partial disassembly of the assembled product is carried out, as in the case of product disposal. Therefore, the manufacturability must take into account the processes of production and disposal of the PD.

Operational MPD should take into account not only the work associated with the operation of the PD, but also the installation and repair of the PD.

All this should be reflected in the formulations of the concept of operational and production manufacturability of PD.

According to the standards, MPD is understood as a set of product design properties that determine its adaptability to achieve optimal costs in production, maintenance and repair for given quality indicators, output and work conditions. As can be seen from this wording, it does not meet the requirements of production manufacturability. It should take into account, firstly, the stage of utilization and, secondly, the “volume of output” should be excluded from the wording, since MPD depends on the technology, and not on the volume of the product and, thirdly, it is necessary to exclude maintenance and repairs related to the stage of product operation.

In this regard, the following formulation of production manufacturability is proposed: *production MPD is understood as a set of product design properties that determine its adaptability to achieve optimal costs in production and disposal for specified quality indicators and work conditions.*

Testing of the PD for manufacturability is carried out at all stages of its creation and disposal.

The effectiveness of the process of testing a PD for manufacturability largely depends on the reliability of the assessment of MPD. Assessment of the level of production MPD is carried out at the stages of its design, technological preparation of production, manufacture and disposal.

It is most difficult to assess MPD when the technologies for its manufacture and disposal are unknown. Therefore, at this stage, the assessment of the level of MPD should be made, firstly, not in absolute, but in relative values, i.e. be determined by the degree of influence of PD characteristics on the labor intensity and cost of the product.

Secondly, as characteristics of the PD, only those that are not directly related to the technological processes of manufacturing and disposal of the product, should be taken into account. For example, such characteristics include a variety of elements, contained in PD, which are not directly related to the technological processes of manufacturing the PD, but at the same time affect the complexity of its manufacture. For example, the greater the variety of elements in the PD is, the greater the laboriousness of its manufacture is.

**Methods for assessment the manufacturability of product design.** Two methods are used for assessment of MPD: assessments in terms of labor intensity and cost of the product and assessment using design manufacturability coefficients.

Using the first method, it is established whether the values of labor intensity and cost of a new product correspond to the specified ones or not. If the values of the labor intensity and cost of the new product turn out to be higher than the specified ones, then the PD must be tested for manufacturability. Tests should begin with those PD characteristics that determine the laboriousness of the manufacture and the product disposal.

The disadvantages of the method for assessment of MPD include the fact that it does not provide information on what PD characteristics affect the labor intensity and the product cost, and to what extent. This leads to an increase in the labor intensity of the testing PD process for manufacturability and largely depends on the subjective.

In contrast to the first method, the second method potentially makes it possible to establish what characteristics of the structure affect the laboriousness of the manufacture and product disposal, and to what extent. This makes it possible to determine with what PD characteristics it is necessary to start improving the PD, in order to increase its manufacturability and the efficiency of manufacturing and product disposal.

The assessment of the industrial MPD level was considered by the second method. The analysis of the manufacturability coefficients showed, that there are no MPD coefficients at the stage of its disposal; the given coefficients are not divided into the stages of operation and manufacturing of the product; they do not cover all the PD characteristics that affect the labor intensity and product disposal and do not reflect the degree of influence of the PD characteristics on the labor intensity of the production and product disposal.

The listed disadvantages do not allow determining the manufacturability coefficients, which have the greatest impact on the labor intensity of manufacturing the PD and thereby identify the PD characteristics with the improvement of which one should start testing the PD for manufacturability.

Thus, for a complete assessment of the production MPD, an integrated approach is required, taking into account the labor intensity of the production and PD disposal.

**Comprehensive assessment of labor intensity at the stages of the product life cycle.** To solve this problem, the labor intensity of the PD should be considered as the sum of the production labor intensity and the labor intensity of disposal (Figure 1), where  $L_1$  – the labor intensity of the design preparation,  $L_2$  – the labor intensity of the technological preparation of the production,  $L_3$  – the labor intensity of the production,  $L_4$  – the labor intensity of the technological preparation of disposal,  $L_5$  – the labor intensity of disposal;

$L_{11}$  – the labor intensity of design and calculation work,  $L_{12}$  – the labor intensity of the working documentation development;

$L_{21}$  – the labor intensity of the manufacturing processes development for the part,  $L_{22}$  – the labor intensity of the assembly process development,  $L_{23}$  – the labor intensity of the technological equipment development;

$L_{31}$  – the labor intensity of preparatory and final work for the parts manufacture,  $L_{32}$  – the labor intensity of technological transitions for the parts manufacture,  $L_{33}$  – the labor intensity of auxiliary transitions,  $L_{34}$  – the labor intensity of preparatory and final assembly work,  $L_{35}$  – the labor intensity of joining parts,  $L_{36}$  – the labor intensity of auxiliary transitions for joining parts;

$L_{41}$  – the labor intensity of the technological processes development for disposal,  $L_{42}$  – the labor intensity of the development and manufacture of technological equipment;

$L_{51}$  – the labor intensity of preparatory and final works,  $L_{52}$  – the labor intensity of technological transitions for the parts disposal,  $L_{53}$  – the labor intensity of auxiliary transitions for the parts disposal,  $L_{54}$  – the labor intensity of disassembling.

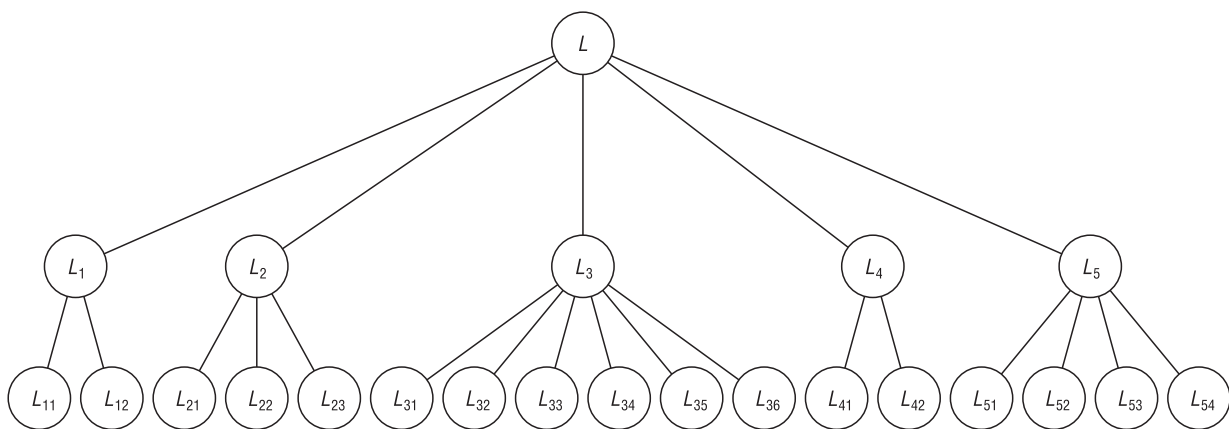


Figure 1. The formation scheme of the full complexity of design, manufacture and disposal product

To establish the coefficients of industrial PD manufacturability at the stages of production and disposal, it is necessary to establish the PD characteristics that affect the labor intensity of the listed types and then establish the degree of their influence.

To solve this problem, we first install the PD elements, the characteristics of which affect the labor intensity of production and disposal.

At the stage of production, we will take parts and their connections as elements, since they determine the complexity of manufacturing. They are divided into purchased, borrowed and original. At the recycling stage, the PD elements are parts, assembly units, connections. All parts and assembly units are divided into defective, recyclable and usable. Suitable parts are divided into: recoverable and not requiring recovery.

After establishing the PD characteristics, their influence on the total labor intensity is determined.

**The influence of design characteristics on the labor intensity of technological preparation and products production.** Example of the influence of PD characteristics on the labor intensity of production (Table).

On the basis of the data in Table, a coefficients list of manufacturability of PD manufacturing was determined [15, 16] and their calculation formulas were developed.

1. *Purchased coefficient:*

$$C_P = a_2 a_{21} \frac{\sum E_{Pi} b_{comi}}{E} + a_2 a_{23} \frac{\sum E_{Pi} b_{comi}}{E} + a_3 a_{31} \frac{\sum E_{Pi} b_{comi}}{E} + a_3 a_{32} \frac{\sum E_{Pi} b_{comi}}{E} + a_3 a_{33} \frac{\sum E_{Pi} b_{comi}}{E},$$

where  $E_{Pi}$  – the  $i$ -th purchased element;  $b_{comi}$  – the coefficient reflecting the design complexity level influence of the  $i$ -th element on manufacture labor intensity;  $E$  – the total number of elements in the PD;  $a_2$  – the influence degree  $L_2$  on  $L$ ;  $a_3$  – the influence degree  $L_3$  on  $L$ ;  $a_{21}$  – the influence degree  $L_{21}$  on  $L_2$ ;  $a_{23}$  – the influence degree  $L_{23}$  on  $L_2$ ;  $a_{31}$  – the influence degree  $L_{31}$  on  $L_3$ ;  $a_{32}$  – the influence degree  $L_{32}$  on  $L_3$ ;  $a_{33}$  – the influence degree  $L_{33}$  on  $L_3$ .

2. *Repeatable details coefficient:*

$$C_{RD} = a_2 a_{21} \frac{\sum (D_{RDj} - 1)_i b_{RD.comi} - \sum (D_{RD.Bj} - 1)_i b_{RD.comi}}{D - D_P - D_B} + a_2 a_{23} \frac{\sum (D_{RDj} - 1)_i b_{RD.comi} - \sum (D_{RD.Bj} - 1)_i b_{RD.comi}}{D - D_P - D_B} + a_3 a_{31} \frac{\sum (D_{RDj} - 1)_i b_{comi}}{D - D_P},$$

where  $D$  – the total number of details;  $D_P$  – the number of purchased details;  $D_{RDj}$  – the  $j$ -th number of repeatable details of the  $i$ -th group;  $D_{RD.Bj}$  – the  $j$ -th number of repeated borrowed details of the  $i$ -th group;  $D_B$  – the number of borrowed details;  $b_{RD.comi}$  – the coefficient taking into account the complexity influence of the design of the  $i$ -th repeatable details on the labor intensity.

3. *Repeatable connections coefficient:*

$$C_{RC} = a_2 a_{22} \frac{\sum (C_{RCj} - 1)_i b_{com.ci}}{C} + a_2 a_{23} \frac{\sum (C_{RCj} - 1)_i b_{com.ci}}{C} + a_3 a_{34} \frac{\sum (C_{RCj} - 1)_i b_{com.ci}}{C},$$

where  $C_{RCj}$  – the  $j$ -th number of repeated connections of the  $i$ -th group;  $C$  – the total number of connections;  $b_{com.ci}$  – the coefficient taking into account the complexity influence of the design of the  $i$ -th repeatable connection on the manufacture labor intensity;  $a_{22}$  – the influence degree  $L_{22}$  on  $L_2$ ;  $a_{34}$  – the influence degree  $L_{34}$  on  $L_3$ .

4. *Coefficient of details material hardness:*

$$C_H = a_3 a_{32} \left( \frac{\sum D_{Hi} b_{Hi} b_{SHi}}{D_H} \right),$$

where  $D_{Hi}$  – the non-purchased details number of the  $i$ -th material hardness value;  $D_H$  – the total number of details;  $b_{Hi}$  – the influence degree of the  $i$ -th value of the details material hardness on the manufacture labor intensity;  $b_{SHi}$  – the coefficient of the influence degree of the detail surface areas size on the reduction of the manufacture labor intensity.

**Influence of product design characteristics on labor intensity subspecies**

Product design characteristics	Labor intensity specie ( $L_i$ )									
	$L_2$			$L_3$						
	$L_{21}$	$L_{22}$	$L_{23}$	$L_{31}$	$L_{32}$	$L_{33}$	$L_{34}$	$L_{35}$	$L_{36}$	
Amount of purchased elements	+		+	+	+	+				
Amount of repeatable details	+		+	+						
Amount of repeatable connections		+	+					+		
Precision methods		+								+
Amount of borrowed elements	+		+							
Amount of typical details	+									
Details precision					+					
Surface roughness of details					+					
Material hardness of details					+					
Mass of product elements								+		+
Amount of connection types									+	

Note. + – influence of characteristics on labor intensity subspecies.

5. *Borrowing coefficient:*

$$C_B = a_2 a_{21} \frac{\sum E_{Bi} b_{B.comi}}{D - D_p} + a_2 a_{23} \frac{\sum D_{Bi} b_{B.comi}}{D - D_p},$$

where  $D_{Bi}$  – the  $i$ -th borrowed details;  $b_{B.comi}$  – the coefficient reflecting the design complexity level of the  $i$ -th borrowed details on the manufacture labor intensity.

6. *Typification coefficient:*

$$C_{TYP} = a_2 a_{21} \frac{\sum D_{TYPi} b_{TYP.comi}}{D - D_p - D_B - D_{RD} + m},$$

where  $D_{TYPi}$  – the typical representative of the  $i$ -th detail group in TD;  $D_{RD}$  – the number of repeatable details;  $m$  – the number of repeatable detail groups;  $b_{TYP.comi}$  – the coefficient taking into account the design complexity influence of the  $i$ -th type representative on the manufacture labor intensity.

7. *Details precision coefficient:*

$$C_{PR} = a_3 a_{32} \left( 1 - \frac{n}{\sum A_i b_{PRi} b_{PRS_i}} \right),$$

where  $A_i$  – the most rigid  $i$ -th accuracy grade, which is chosen between the accuracy grade assigned to the surface size, to its shape deviation and to the size of the relative position;  $n$  – the number of details surface areas in the product;  $b_{PRi}$  – the coefficient, taking into account the labor intensity of achieving precision  $A_i$ , when the part is processed, ranging from 0 to 1;  $b_{PRS_i}$  – the area fraction of the  $i$ -th detail surface from the total surface area of all details in the product taken as a unit.

8. *Coefficient of details surfaces roughness:*

$$C_{RN} = a_3 a_{32} \left( 1 - \frac{n}{\sum B_i b_{RNi} b_{SRNi}} \right),$$

where  $B_i$  – the value of the  $i$ -th details surface roughness parameter in the product;  $b_{RNi}$  – the coefficient, taking into account the laboriousness of achieving the parameter  $B_i$ , when processing a detail, ranging from zero to one;  $b_{SRNi}$  – the area proportion of the  $i$ -th details surface from the total surface area of all details in the product taken as a unit.

9. *Coefficient of precision methods efficiency (for the closing links of dimensional chains):*

$$C_{MDCH} = a_3 a_{35} \left( \frac{CI \cdot b_{P.CI} + ICI \cdot b_{P.ICI} + GI \cdot b_{P.GI} + ADJ \cdot b_{P.ADJ} + FT \cdot b_{P.FT}}{n_{DCH}} \right) +$$

$$+ a_3 a_{35} \left( \frac{CI \cdot b_{M.CI} + ICI \cdot b_{M.ICI} + GI \cdot b_{M.GI} + ADJ \cdot b_{M.ADJ} + FT \cdot b_{M.FT}}{n_{DCH}} \right),$$

where CI – the number of dimensional chains, assembled by the complete interchangeability method; ICI – the number of dimensional chains, assembled by the incomplete interchangeability method; GI – the number of dimensional chains, assembled by the group interchangeability method; ADJ – the number of dimensional chains, assembled by the adjustment method; FT – the number of dimensional chains, assembled by the fitting method;  $b_{P.CI}$  – the coefficient of the influence degree of the complete interchangeability method on the production labor intensity;  $b_{P.ICI}$  – the coefficient of the influence degree of incomplete interchangeability method on the production labor intensity;  $b_{P.GI}$  – the coefficient of the influence degree of group interchangeability method on the production labor intensity;  $b_{P.ADJ}$  – the coefficient of the influence degree of adjustment interchangeability method on the production labor intensity;  $b_{P.FT}$  – the coefficient of the influence degree of fitting method on the production labor intensity;  $b_{M.CI}$  – the coefficient of the influence degree of the complete interchangeability method on the manufacture labor intensity;  $b_{M.ICI}$  – the coefficient of the influence degree of incomplete interchangeability method on the manufacture labor intensity;  $b_{M.GI}$  – the coefficient of the influence degree of group interchangeability method on the manufacture labor intensity;  $b_{M.ADJ}$  – the coefficient of the influence degree of

adjustment interchangeability method on the manufacture labor intensity;  $b_{M,FT}$  – the coefficient of the influence degree of fitting method on the manufacture labor intensity.

10. *Connection coefficient:*

$$C_C = a_3 a_{35} \frac{\sum n_{Ci} b_{Ci} b_{SCi}}{n_C},$$

where  $n_{Ci}$  – the number of  $i$ -th type connections;  $n_C$  – the number of connections in the product;  $b_{Ci}$  – the influence degree of the  $i$ -th connection type on labor intensity (for cylindrical movable ones  $b_{Ci}$  will have a minimum value and for welded joints it will be maximum);  $b_{SCi}$  – the contact areas proportion of the  $i$ -th connection type to total contact area of all joints in the product taken as a unit;  $a_{35}$  – the influence degree of  $L_{35}$  on  $L_3$ .

11. *Element mass coefficient:*

$$C_M = a_3 a_{33} \frac{\sum E_{Mi} \cdot b_{Mi}}{E_M} + a_3 a_{36} \frac{\sum E_{Mi} \cdot b_{Mi}}{E_M},$$

where  $E_{Mi}$  – the number of the  $i$ -th mass value elements;  $E_M$  – the number of PD elements;  $b_{Mi}$  – the influence degree of the  $i$ -th element mass value on manufacture labor intensity;  $a_{36}$  – the influence degree of  $L_{36}$  on  $L_3$ .

Coefficients  $a$ , reflecting the influence degree of manufacturability on labor intensity, are determined from the following relations:

$$a_2 = \frac{L_2}{L}, a_{21} = \frac{L_{21}}{L_2}, a_{22} = \frac{L_{22}}{L_2}, a_{23} = \frac{L_{23}}{L_2},$$

$$a_3 = \frac{L_3}{L}, a_{31} = \frac{L_{31}}{L_3}, a_{32} = \frac{L_{32}}{L_3}, a_{33} = \frac{L_{33}}{L_3}, a_{34} = \frac{L_{34}}{L_3}, a_{35} = \frac{L_{35}}{L_3}, a_{36} = \frac{L_{36}}{L_3}.$$

The given calculation formulas of manufacturability coefficients make it possible to determine an integral assessment of the manufacturability level at the manufacturing stage by summing their values.

The manufacturability coefficients of disposal preparation and design production preparation are determined by the same method.

**Specificity of the influence of the design labor intensity on the technological production preparation.** In modern conditions of frequent production diversification and taking into account the specifics of some designs of mechanical engineering products, for example, cutting and measuring tools and means of technological and metrological equipment, the approach to determining the manufacturability coefficients should be somewhat refined for the design and technological production preparation. In particular, it is necessary to determine the frequency and duration of the use of tools and equipment in the production process.

For this, the details number and the frequency of structural elements, meeting the same type in terms of their characteristic standard size, for example, the diameter of the hole in the parts, are determined in the product [5, 17]. At the same time, in the process of design preparation for production, the structural elements sizes are estimated, which determine their production by cutting tools. Further, if necessary, in the process of technological production preparation, the duration of the use of auxiliary tools and equipment, machines and devices is taken into account.

Statistical data analysis can be represented by histograms of the frequency and duration of the encounter and the use of structural elements, cutting and measuring tools, etc.

Those constructive elements and, accordingly, tools that are rare, can be unified and replaced with frequently occurring ones.

The efficiency of using the cutting tool at the first level can be estimated by the coefficient of the conditional duration of use.

$$C_{Ui} = F_i \cdot D_i,$$

where  $F_i$  and  $D_i$  – the frequency and duration of the detail element meeting and the use of the cutting tool, respectively.

Tools that are common and can be replaced by new, more effective ones, should be evaluated by the second level indicators. This compares the indicators of the basic (previously used) and new instruments.

The criteria can be used:  
tool life coefficient:

$$C_{TL} = T_N/T_B,$$

where  $T_N$  and  $T_B$  – the durability periods of the new and basic tools, respectively;  
machinability coefficient of detail material:

$$C_M = V_N/V_B,$$

where  $V_N$  and  $V_B$  – the cutting speeds with new and basic tools, respectively;  
precision and quality coefficient:

$$C_{P,Q} = (IT, Ra)_B/(IT, Ra)_N,$$

where  $(IT, Ra)_B$  and  $(IT, Ra)_N$  – the precision and roughness of the machined surface of detail structural element with the basic and new cutting tool, respectively.

Indicators or criteria of the third level characterize the cutting tool at the manufacturing stage. In particular, the cost coefficient of the cutting tool is:

$$C_{CS} = C_B/C_N,$$

where  $C_B$  and  $C_N$  – the cost of the basic and new cutting tools, respectively;  
payback coefficient of the cutting tool:

$$C_{PB} = CS_N/(C_B - C_N),$$

where  $CS_N$  – costs for a new cutting tool.

The effectiveness of one or more candidate tools can be assessed at each of the given levels or in aggregate in points [5, 17]:

$$C_{EF} = C_U \cdot C_{TL} \cdot C_M \cdot C_{P,Q} \cdot C_{CS} \cdot C_{PB},$$

or by the generalized desirability function:

$$C_{DEF} = f(C_U, C_{TL}, C_M, C_{P,Q}, C_{CS}, C_{PB}).$$

The cutting tool with the highest  $C_{EF}$  score is considered the most effective.

Desirability refers to one or another level of a parameter or criterion for assessing the effectiveness of the cutting tool use. On a special scale, the desirability value can vary from 0 to 1 (Figure 2).

The values of  $C_{DEF} = 1$  correspond to the maximum possible criterion level, and  $C_{DEF} = 0$  – the minimum.

The desirability function is described by the expression:

$$C_{DEFi} = \exp(-\exp(C_i)),$$

where  $C_i$  – the dimensionless value of a parameter or criterion, given in accordance with the de-

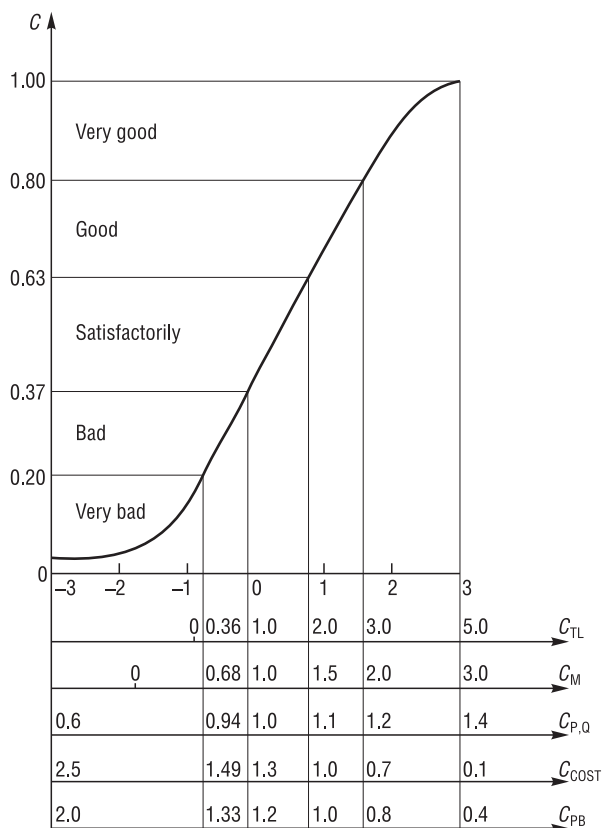


Figure 2. Generalized desirability function of efficiency coefficient set of the tool use in production

sirability scale [16, 18]. The generalized desirability function is formed as the geometric mean of the desirability parameters:

$$C_{DEF} = \sqrt[n]{C_{DEF_1} \cdot C_{DEF_2} \cdot \dots \cdot C_{DEF_n}}$$

As a result, to determine the effectiveness of the tool use, an expert system has been proposed, which includes: a database on certain parameters of products, parts, cutting and measuring tools and other objects of the technological environment; analysis methods, using mathematical statistics of the frequency and duration of the detail elements, tools and other objects meeting; procedures for assessing the condition of the instrument at the stages of its manufacture, operation and disposal.

**Conclusion.** On the technical and economic analysis basis of the relation properties between design and technological solutions, a method for the integral assessment of production manufacturability in the life cycle of a product is proposed.

The assessment method combines various manufacturability coefficients, taking into account their influence degree on the labor intensity of production and maintenance, repair and disposal of the product structure.

An effectiveness examination of the tool, equipment and other objects use of the technological environment at the stages of design and technological production preparation has been formalized.

Based on the results of the technical and economic assessment, it is proposed to understand the product design manufacturability at the stages of its production and disposal as production manufacturability.

## References

1. Kheifetz M. L. (ed.) *Quality Assurance of Products in Technological Complexes*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 248 p. (in Russian).
2. Vasiliev A. S., Dal'sky A. M., Klimenko S. A., Polonski L. G., Kheifetz M. L., Yashcheritsyn P. I. *Technological Bases of Machine Quality Management*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2003. 256 p. (in Russian).
3. Dal'sky A. M., Bazrov B. M., Vasiliev A. S., Dmitriev A. M., Kolesnikov A. G., Kondakov A. I., Shachnev Ya. A. *Technological Strain in Mechanical Engineering*. Moscow, Moscow Aviation Institute, 2000. 364 p. (in Russian).
4. Kheifetz M. L., Chemisov B. P. (eds.) *Intellectual Production: State and Prospects*. Novopolotsk, Polotsk State University, 2002. 268 p. (in Russian).
5. Kheifetz M. L., Tochilo V. S., Semenov V. I., Kukhta S. V., Kosyak L. N. *Statistical Analysis of Structural Elements and Technological Parameters of Machine Parts*. Novopolotsk, Polotsk State University, 2001. 112 p. (in Russian).
6. Korshunov Yu. M. *Mathematical Foundations of Cybernetics*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 496 p. (in Russian).
7. Ebeling W. *Strukturbildung bei Irreversiblen Prozessen* [Formation of Structures in Irreversible Processes]. Leipzig, Teubner-Verlag, 1976 (in German).
8. Sigorskii V. P. *Engineer's Mathematical Apparatus*. Kiev, Tekhnika Publ., 1977. 768 p. (in Russian).
9. Haken G. *Synergetics*. Wiesbaden, Vieweg+Teubner Verlag, 1973. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-01511-6>
10. Bazrov B. M., Kheifets M. L., Popok N. N. Unification of Design Decisions on the Basis of Average Distribution of Probabilities and Introduction of Isolated Areas for Elements of Products Described by Structured Multiple Modules. *Nonlinear Phenomena in Complex Systems*. 2019, vol. 22, no. 3, pp. 221–232. <https://doi.org/10.33581/1561-4085-2019-22-3-221-232>
11. Gordienko A. I., Kheifetz M. L., Kozhouro L. M., Rakomsin A. P., Sidorenko M. I., Eidelman E. D., Senchilo I. A. *Combined Physico-Chemical Treatment: Synergetic Aspect*. Minsk, Technoprint Publ., 2004. 200 p.
12. Amirov Yu. D., Alferova T. K., Volkov P. N. *Manufacturability of Product Designs*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 368 p. (in Russian).
13. Balabanov A. N. *Manufacturability of Structures of Machine Parts*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 336 p. (in Russian).
14. Bochkarev P. Yu., Bokova L. G. *Assessment of Production Manufacturability of Parts*. Moscow, Lan' Publ., 2017. 132 p. (in Russian).
15. Bazrov B. M., Troitskii A. A. Analysis of the coefficients of manufacturability of the design of the product. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2018, no. 7, pp. 23–26 (in Russian).
16. Troitskii A. A. Calculation formulas for the coefficients of production manufacturability of product design. *Naukoemkietekhnologii v mashinostroenii = Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*, 2020, no. 8, pp. 25–28 (in Russian).
17. Popok N. N. *Mobile Reorganization of Engineering Production*. Minsk, Technoprint Publ., 2001. 396 p. (in Russian).
18. Kheifetz M. L. *Mathematical Modeling of Technological Processes*. Novopolotsk, Polotsk State University, 1999. 104 p. (in Russian).

### Information about the authors

*Boris M. Bazrov* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory, Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences (4, Maly Khariton'yevsky Pereulok, Moscow, 101990, Russian Federation). E-mail: modul\_lab@mail.ru

*Mikhail L. Kheifetz* – D. Sc. (Engineering), Professor, Director, Institute of Applied Physics of National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., Minsk, 220072, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>. E-mail: mlk-z@mail.ru

*Valery L. Hurevich* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Director, Belarussian State Institute of Metrology (16, Starovilenskiy Tract, Minsk, 220072, Republic of Belarus). E-mail: hurevich@belgim.by

*Nikolay N. Popok* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, Polotsk State University (29, Blokhin Str., Novopolotsk, 211440, Republic of Belarus). E-mail: n.popok@psu.by

### Информация об авторах

*Базров Борис Мухтарбекович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией, Институт машиноведения имени А.А. Благонравова Российской академии наук (Малый Харитоньевский пер., 4, 101990, Москва, Российская Федерация). E-mail: modul\_lab@mail.ru

*Хейфец Михаил Львович* – доктор технических наук, профессор, директор, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>. E-mail: mlk-z@mail.ru

*Гуревич Валерий Львович* – кандидат технических наук, доцент, директор, Белорусский государственный институт метрологии (Старовиленский тракт, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: hurevich@belgim.by

*Попок Николай Николаевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Витебская обл., Республика Беларусь). E-mail: n.popok@psu.by



ISSN 1561-8358 (print)

ISSN 2524-244X (online)

УДК 621.77

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-433-444>

Поступила в редакцию 30.04.2019

Received 30.04.2019

**Г. В. Кожевникова, А. А. Абрамов, К. А. Климов***Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА  
В ПРОЦЕССАХ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКИ**

**Аннотация.** Рассмотрен метод компьютерного прогнозирования размеров зерен металла, их разориентации, границ зерен и плотности дислокаций в зависимости от режимов поперечно-клиновой прокатки. Выявлены закономерности формирования параметров структуры металла в зависимости от напряженного состояния методами компьютерного моделирования. Напряженное состояние описано двумя параметрами: средним напряжением и параметром третьего инварианта девиатора напряжений. Впервые установлено влияние напряженного состояния в очаге деформации на параметры структуры металла. Новый метод позволяет повысить качество изделий путем компьютерной оптимизации режимов прокатки. Приведены результаты определения структуры металла и параметров напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при горячей прокатке вала водяного насоса из стали 45. Проведена верификация и анализ данных виртуальных экспериментов по формированию структуры конструкционных сталей в процессах поперечно-клиновой прокатки. Для анализа выходных данных моделирования использованы параметры прогнозирования расчета границ зерен, размера зерен. Созданная компьютерная модель прогнозирования характеристик структур металла в зависимости от режимов пластической деформации обеспечивает при минимальных затратах и без проведения натурных экспериментов нахождение оптимальных термодинамических и напряженно-деформированных режимов пластического течения металла, гарантирующих наивысшие эксплуатационные свойства получаемых изделий.

**Ключевые слова:** пластическое деформирование, структура металла, напряженно-деформированное состояние, пластичность

**Для цитирования:** Кожевникова, Г. В. Прогнозирование структуры металла в процессах поперечно-клиновой прокатки / Г. В. Кожевникова, А. А. Абрамов, К. А. Климов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 433–444. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-433-444>

**Grazhina V. Kozhevnikova, Andrei A. Abramov, Kirill A. Klimov***Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***METAL STRUCTURE PREDICTION IN CROSS-WEDGE ROLLING PROCESSES**

**Abstract.** A method of computer prediction of the size of metal grains, their disorientation, grain boundaries and dislocation density, depending on the modes of cross-wedge rolling, is considered. The regularities of the formation of the parameters of the metal structure depending on the stress state are revealed by methods of computer simulation. The stress state is described by two parameters: the average stress and the parameter of the third invariant of the stress deviator. The effect of the stress state in the deformation zone on the metal structure parameters was determined for the first time. The new method allows improvement of the quality of products by computer optimization of rolling modes. The results of determining the metal structure and parameters of the stress-strain state in the deformation zone during hot rolling of the water pump shaft of steel 45 are presented. The verification and analysis of the data of virtual experiments on the formation of the structure of structural steels in the processes of cross-wedge rolling are carried out. To analyze the output data of the simulation, the parameters for predicting the calculation of grain boundaries and grain size were used. The created computer model for predicting the characteristics of metal structures, depending on the modes of plastic deformation, provides, at minimal cost and without carrying out field experiments, finding the optimal thermodynamic and stress-strain modes of plastic flow of metal, which guarantee the highest operational properties of the products obtained.

**Keywords:** plastic straining, metal structure, stress-strain state, plasticity

**For citation:** Kozhevnikova G. V., Abramov A. A., Klimov K. A. Metal structure prediction in cross-wedge rolling processes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 433–444 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-433-444>

**Введение.** Исследование вопросов обработки металлов давлением включает не только определение усилий деформирования, напряженно-деформированного состояния в очаге деформации, скоростей течения металла, упрочнения, изменений температуры, но и формирование структуры металла и зависящих от нее механических свойств изделий. Формирование структуры зависит от многих параметров процесса деформации, марки материала, его исходного состояния и других факторов.

Структура металла является основным фактором, определяющим прочностные и иные эксплуатационные свойства металлических изделий. Так, уменьшение размера зерна в значительной степени способствует повышению прочности металла, его вязкости, пластичности и снижению склонности к хрупкому разрушению [1–3]. Дислокации наряду с влиянием на пластичность и прочность металла воздействуют на его физические свойства: электросопротивление, скорость диффузии и химическую стойкость [4].

Зерна металла состоят из отдельных субзерен, образующих субструктуру. Субзерна разориентированы относительно друг друга на незначительную величину: от долей до единиц градусов. Углы разориентации субзерен распределены по закону нормального распределения Гаусса. Деформация металла, как правило, сопровождается ростом количества дислокаций. Согласно [5] плотность дислокаций  $U_{\text{суб}}$  в субзерне определяется как

$$U_{\text{суб}} = \frac{\delta_{\text{ср}}}{b \cdot D}, \quad (1)$$

где  $\delta_{\text{ср}}$  – средний угол разориентации субзерен,  $b$  – вектор Бюргерса,  $D$  – размер субзерна.

С учетом распределения углов разориентации субзерен по закону Гаусса выражение (1) может быть преобразовано следующим образом:

$$U_{\text{суб}} = \frac{\delta_{\text{max}}}{3 \cdot b \cdot D_{\text{ср}}}, \quad (2)$$

где  $\delta_{\text{max}}$  – максимальный диапазон значений разориентации субзерен,  $D_{\text{ср}}$  – средний размер субзерна.

Под плотностью дислокаций принято понимать суммарную длину всех линий дислокаций в см в единице объема  $1 \text{ см}^3$ , то есть  $\text{см}/\text{см}^3$  или  $\text{см}^{-2}$ . В отожженном металле плотность дислокаций невысокая – порядка  $10^7$ – $10^8 \text{ см}/\text{см}^3$ , в сильнодеформированном –  $10^{11}$ – $10^{12} \text{ см}/\text{см}^3$ , то есть до  $10^7 \text{ км}$  (приблизительно десятая часть расстояния от Земли до Солнца).

В качестве размера зерна ГОСТ 5639–82 определяет средний диаметр зерна стали  $d_m$ , мкм, в его поперечном сечении

$$d_m = \frac{1}{\sqrt{m}}, \quad (3)$$

где  $m$  – количество зерен на площади  $1 \text{ мм}^2$  шлифа.

В сплавах, состоящих из нескольких фаз, средний диаметр зерна – это размер зерна матрицы.

Известно, что в чистом железе увеличение числа зерен в 30 раз и, соответственно, уменьшение их размера увеличивает предел прочности от 237 до 294 МПа (на 24 %) и пластичность (относительное удлинение) – от 35,3 до 47,5 % (на 35 %). Таким образом, уменьшением размера зерна в металле достигается улучшение его механических свойств.

В исследуемом образце металла зерна различаются по размерам, поэтому принято представлять итоговую информацию о них в виде гистограммы, где по оси абсцисс откладывается узкий диапазон размера зерна, по оси ординат – количество зерен этого диапазона в исследуемом образце. Аналогичным образом принято представлять информацию по разориентации зерен металла: по оси абсцисс откладывается узкий диапазон угла разориентации в градусах, по оси ординат – количество зерен с данным диапазоном разориентации в исследуемом образце.

Как правило, размер разориентации субзерен составляет от долей до  $5^\circ$ . Размер разориентации зерен в свою очередь составляет десятки градусов. Исключение составляет наличие текстуры в металле после больших пластических деформаций, сопровождающихся значительной анизотропией его механических свойств, – в этом случае разориентация зерен составляет несколько градусов.

Современное развитие компьютерной техники позволяет моделировать формирование структуры металла при пластических деформациях при наличии математических моделей этого формирования. Задача разработки модели для проведения компьютерного моделирования процесса деформирования металла сводится к следующим этапам: созданию конечно-элементной модели инструмента и заготовки, выбору модели материала и заданию ее свойств, заданию граничных условий и параметров моделирования. Данные этапы являются основополагающими при создании компьютерной модели поперечно-клиновой прокатки [6]. Это связано с тем, что моделирование осуществляется на базе конечно-элементной сеточной модели исследуемого процесса, включающей набор элементов и узлов, аппроксимирующих исходную геометрию инструмента и заготовки. Модель материала определяет поведение заготовки в процессе деформации, позволяя корректно рассчитать ее напряженно-деформированное состояние. Граничные условия и параметры моделирования определяют технологические параметры прокатки, такие как скорость инструмента, трение между формообразующими поверхностями и заготовкой, начальную температуру и т. д.

Современные системы конечно-элементного анализа дают возможность точно предсказывать процесс формообразования поковки и формирование возможных дефектов течения металла, а также оценить микроструктуру поковки. Каждая из указанных возможностей может значительно повысить эффективность разработки технологии и избежать многих проблем, которые иногда возникают на этапах внедрения технологий, а также повысить качество продукции.

Компьютерное моделирование параметров микроструктуры материала при пластических деформациях в процессах обработки металлов давлением являются одним из перспективных направлений в настоящее время. Изучение деформационных процессов, происходящих в металле, невозможно без перехода на микроуровень, так как именно параметры структуры являются наиболее емкими при определении изменений в ходе процесса деформации [4].

*Цель исследования* заключалась в выявлении закономерностей формирования параметров структуры металла в зависимости от напряженного состояния методами компьютерного моделирования; разработке аппарата компьютерного прогнозирования характеристик микроструктуры конструкционных сталей: ориентации и размеров зерен, плотности дислокаций при горячей поперечно-клиновой прокатке.

**Влияние пластической деформации на структуру металла.** Увеличение горячей деформации металла сопровождается нелинейным уменьшением размеров зерен, увеличением их разориентации и плотности дислокаций. Аналогичный результат получается при холодной деформации с последующим рекристаллизационным отжигом. На рис. 1 показана зависимость размеров зерна анодной меди при ее деформации, начиная с состояния отливки [7].

Степень деформации  $\delta$  определялась по формуле

$$\delta = \frac{(l_k - l_0) \cdot 100\%}{l_0}, \quad (4)$$

где  $l_0$  – исходная длина образца,  $l_k$  – конечная длина образца.

В теории пластичности накопленную деформацию принято рассчитывать [8] согласно выражению

$$\Lambda = 2\sqrt{3} \ln \frac{d_0}{d_k}, \quad (5)$$

где  $d_0$  – исходный диаметр образца,  $d_k$  – диаметр образца после деформации,  $\Lambda$  – степень деформации сдвига.

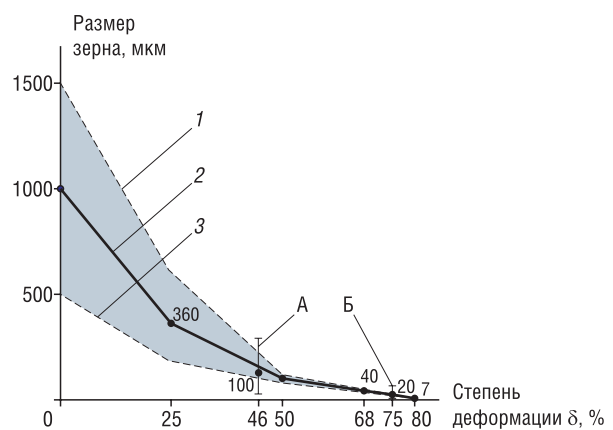


Рис. 1. Зависимость размеров зерна анодной меди от пластической деформации с последующим рекристаллизационным отжигом: 1 – максимальный размер зерна, 2 – преобладающий размер зерна, 3 – минимальный размер зерна, А – горячая деформация на 46 % без отжига, Б – горячая деформация на 75 % без отжига

Fig. 1. Dependence of sizes of grain of anode copper on plastic deformation with further recrystallization annealing: 1 – maximum grain size, 2 – the prevailing grain size, 3 – minimum grain size, А – hot deformation by 46 % without annealing, Б – hot deformation by 75 % without annealing

Зависимость размеров зерен анодной меди от накопленной деформации, рассчитанной по формуле (5), показана на рис. 2.

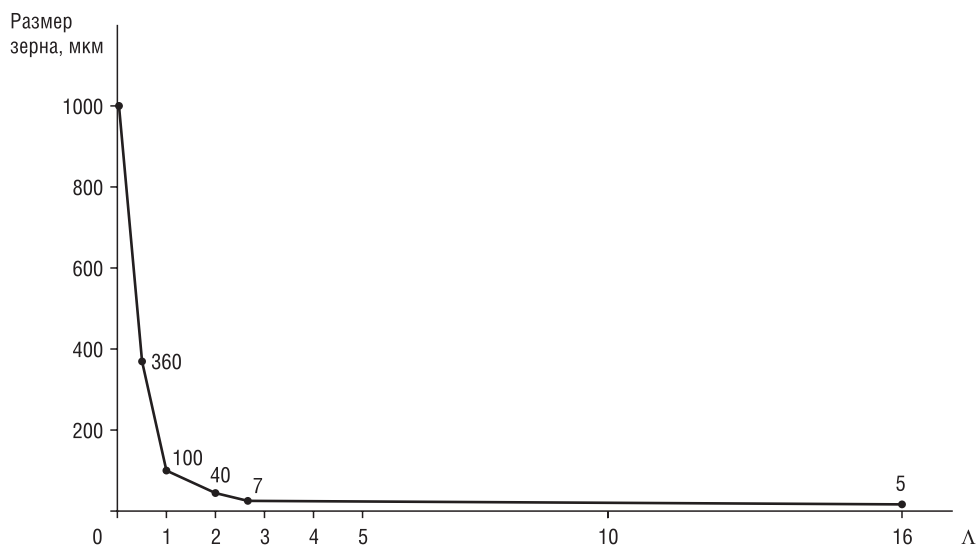


Рис. 2. Зависимость размеров зерен анодной меди от степени деформации сдвига  $\Lambda$

Fig. 2. Dependence of sizes of grain of anode copper on degree of shear strain  $\Lambda$

Наиболее интенсивно уменьшение размера зерна происходит в области от литого состояния до деформации приблизительно  $\Lambda = 1$ . При дальнейшем нарастании деформации уменьшение размеров зерна снижается. В этой второй области зависимость размеров зерна от накопленной деформации может аппроксимироваться выражением

$$d_m = A \cdot \Lambda^3 + B \cdot \Lambda^2 + C \cdot \Lambda + D, \text{ мкм.} \quad (6)$$

Для случая с анодной медью  $A = 4,685$ ;  $B = -86,000$ ;  $C = 177,000$ ;  $D = -0,00219$ .

С накоплением деформации плотность дислокаций увеличивается, и эта зависимость аналогична зависимости размеров зерна от деформации: вначале наблюдается интенсивный рост плотности дислокаций, который затем замедляется с накоплением деформации.

Когда плотность дислокаций достигает величины  $\rho = 10^{12} - 10^{13} \text{ см/см}^3$ , в металле образуются микротрещины, которые увеличиваются в размере при дальнейшем накоплении деформации. Этим обстоятельством можно объяснить нелинейность падения пластических свойств металла по отношению к накопленным деформациям.

Рассмотрим изменение структуры металла на протяжении процесса деформации вплоть до разрушения. В исходном состоянии в металле присутствует определенное количество дислокаций, микротрещин и микропустот, а также неметаллических включений, которые служат концентраторами напряжений и, следовательно, повышенных деформаций [9].

С началом деформаций в металле нелинейно увеличивается (вначале более интенсивно) плотность дислокаций. При достижении ею величины  $\rho = 10^{12} - 10^{13} \text{ см/см}^3$  к ранее имеющимся микротрещинам добавляются вновь зарождаемые под действием дислокаций. Это приводит к ускоренному падению пластических свойств металла. Если на этой стадии произвести отжиг металла, то плотность дислокаций снижается и пластические свойства металла восстанавливаются [5]. Далее начинается вторая стадия потери пластических свойств, которая характеризуется менее интенсивным ростом плотности дислокаций, но значительным увеличением количества и размеров микротрещин. Пластичность металла на этой стадии снижается по отношению к деформации более интенсивно, чем на первой стадии. На третьей, последней стадии потери пластических свойств микротрещины объединяются в макротрещины, которые окончательно разрушают металл. Эта стадия осуществляется при небольшом приросте деформации, то есть потеря пластических свойств на этом этапе максимальная.

Таким образом, на протяжении всех трех этапов потери пластических свойств плотность дислокаций возрастает (интенсивно в начале и менее интенсивно в дальнейшем). На второй стадии ускоренное падение пластических свойств в большей степени обеспечивает рост количества микротрещин и увеличение их размера. На третьей стадии интенсивное падение пластических свойств обеспечивает образование макротрещин и рост их размера. Отметим, что вследствие больших размеров макротрещин восстановление пластичности металла на третьей стадии деформации высокотемпературным отжигом невозможно [5]. Подведем итог: пластические свойства деформированного металла снижаются в начале процесса медленнее, чем в конце.

Если процесс деформирования металла осуществляется за несколько этапов с различными напряженно-деформированными состояниями, возникает необходимость определить потерю его пластических свойств на каждом этапе. Для этого введено безразмерное определение – повреждаемость металла  $\Pi$ , которая суммируется линейно на каждом из этапов. В начальном состоянии  $\Pi = 0$ , при разрушении  $\Pi = 1$ . Зависимость повреждаемости от накопленной деформации принято определять выражением

$$\Pi = \Lambda^{\rho}, \quad (7)$$

где  $\rho$  – показатель нелинейности (накопления повреждаемости).

Как показали наши исследования [7, 10, 11], показатель нелинейности  $\rho$  зависит не только от материала и напряженного состояния при пластическом течении металла, но и от размера накопленной деформации  $\Lambda$ . В итоге критерий разрушения на  $n$ -этапе деформирования может быть записан как

$$\sum_{i=1}^n \Pi_i \geq 1. \quad (8)$$

Актуальной задачей является оценка ресурса пластичности материала после процесса обработки давлением, то есть определения количества оставшихся пластических свойств металла до его разрушения. Данный показатель во многом определяет эксплуатационные свойства изделия из подвергнутого обработке материала [12]. Показателем оценки ресурса пластичности могут служить повреждаемость металла  $\Pi$  (7) и ресурс пластичности  $\lambda$  [10]:

$$\lambda = 1 - \frac{\Lambda}{\Lambda_{\text{пр}}}, \quad (9)$$

где  $\Lambda_{\text{пр}}$  – предельная степень деформации сдвига, при которой происходит разрушение металла.

Показателем оценки ресурса пластичности также может служить плотность дислокаций металла  $U$  с учетом того, что она постоянно изменяется (возрастает) от начала деформации до момента разрушения и однозначно связана с накопленными деформациями.

Плотность металла также может быть использована в качестве показателя пластических свойств, так как она может с высокой точностью экспериментально определяться взвешиванием на воздухе и в жидкости и отражать количество и размеры как макро-, так и микротрещин.

Изучение влияния процесса пластической деформации на структуру металла позволяет разработать методику прогнозирования и оптимизации эксплуатационных качеств изделий, получаемых обработкой давлением.

**Метод расчета параметров структуры материала при горячей поперечно-клиновой прокатке на базе цифровых технологий.** Нами разработан метод расчета параметров структуры материала при горячей поперечно-клиновой прокатке на базе цифровых технологий. Он позволяет прогнозировать размеры зерен, их разориентацию, границы зерен и плотность дислокаций по всему объему конечного продукта.

В начале расчета методом конечных элементов определяется напряженно-деформированное состояние в любой момент времени прокатки и по всему объему деформированного изделия [7, 13]: тензоры, девиаторы и их инварианты напряжений и деформаций, скорости деформаций, температура материала с учетом выделения тепла в инструмент и окружающую среду. Исходной информацией для расчета служат свойства материала в области температур деформации, исходная структура металла, геометрия клинового инструмента и параметры процесса прокатки.

На базе полученной информации рассчитываются с использованием модели Джонсона–Мейла–Аврами–Колмогорова (ЖМАК-модель) [14] доли рекристаллизованного объема для статической и динамической рекристаллизации.

Поскольку статическая рекристаллизация происходит путем образования зародышей и их последующего роста, отношения между долями статически-рекристаллизованного объема  $X_S$  и временем  $t$  определяется соотношением

$$X_S = 1 - \exp(-B_S \cdot t^{K_S}), \quad (10)$$

где  $B_S$  – коэффициент роста,  $K_S$  – экспоненциальный коэффициент образования зародышей для статической рекристаллизации.

Динамическая рекристаллизация является сложным процессом из-за одновременной генерации дислокаций и их уничтожения путем рекристаллизации. Принято этот процесс определять соотношением

$$X_D = 1 - \exp(-B_D \cdot \varepsilon^{K_D}), \quad (11)$$

где  $X_D$  – доля динамически-рекристаллизованного объема материала,  $\varepsilon$  – деформация,  $B_D$  – коэффициент роста,  $K_D$  – экспоненциальный коэффициент образования зародышей для статической рекристаллизации.

Формула (11) справедлива при условии, что деформация превышает некоторое пороговое значение.

Плотность дислокаций в разработанном методе расчета параметров структуры материала определяется на основе известных положений:

1) плотность дислокаций  $U$  равна сумме длин дислокаций в 1 см материала, то есть суммируются длины дислокаций всех субзерен:

$$U = \sum U_{\text{суб}}; \quad (12)$$

2) так как плотность дислокаций при деформации материала не может уменьшаться, за любой промежуток времени отношение увеличения плотности дислокаций к увеличению накопленной деформации – величина положительная и уменьшается с ростом накопленной деформации:

$$\frac{dU_i}{d\Lambda_i} \geq \frac{dU_{i+1}}{d\Lambda_{i+1}}. \quad (13)$$

В разработанном авторами методе приняты следующие достаточно обоснованные допущения:

1) максимальный диапазон значений разориентации зерен материала  $\delta_{\text{max}}$  пропорционален сумме максимальных диапазонов значений разориентации субзерен:

$$\delta_{\text{max}} = \delta_{\text{max.суб}} \cdot n \cdot m \cdot A, \quad (14)$$

где  $\delta_{\text{max.суб}}$  – максимальный диапазон значений разориентации субзерен материала,  $n$  – среднее значение количества субзерен в зерне,  $m$  – среднее значение количества зерен в 1 см<sup>3</sup>,  $A$  – нормирующий множитель формулы (14);

2) вводится коэффициент соответствия плотности дислокаций и условной плотности дислокаций  $K$

$$K = 3 \cdot b_{\text{ср}} \cdot B \cdot A \cdot \Lambda, \quad (15)$$

где  $b_{\text{ср}}$  – среднее значение вектора Бюргерса,  $B$  – нормирующий множитель при определении среднего значения вектора Бюргерса;

3) вводится понятие условной плотности дислокаций  $U_{\text{усл}}$

$$U_{\text{усл}} = 3 \cdot K \cdot U. \quad (16)$$

Условная плотность дислокаций  $U_{\text{усл}}$  служит исключительно для оценки факта увеличения или уменьшения плотности дислокаций при изменении параметров процесса деформации материала и не используется для определения истинного размера плотности дислокаций.

**Моделирование параметров структуры стали 45 при поперечно-клиновой прокатке на базе цифровых технологий.** В качестве примера рассмотрен процесс поперечно-клиновой прокатки вала водяного насоса 245-1307052 из стали 45. Анализируется участок детали, который прокатывается с диаметра 28 мм при 1100 °С со скоростью 0,3 м/с и степенью обжатия 1,71 на клиновом инструменте с углом наклона боковой грани  $\alpha = 30^\circ$  и углом заострения  $\beta = 9^\circ$ . Результаты расчета методом конечных элементов накопленных деформаций  $\Lambda$  в трех точках поперечного сечения образца: P1 в осевой области, P3 в поверхностных слоях, P2 посреди точек P1 и P3, – показаны на рис. 3.

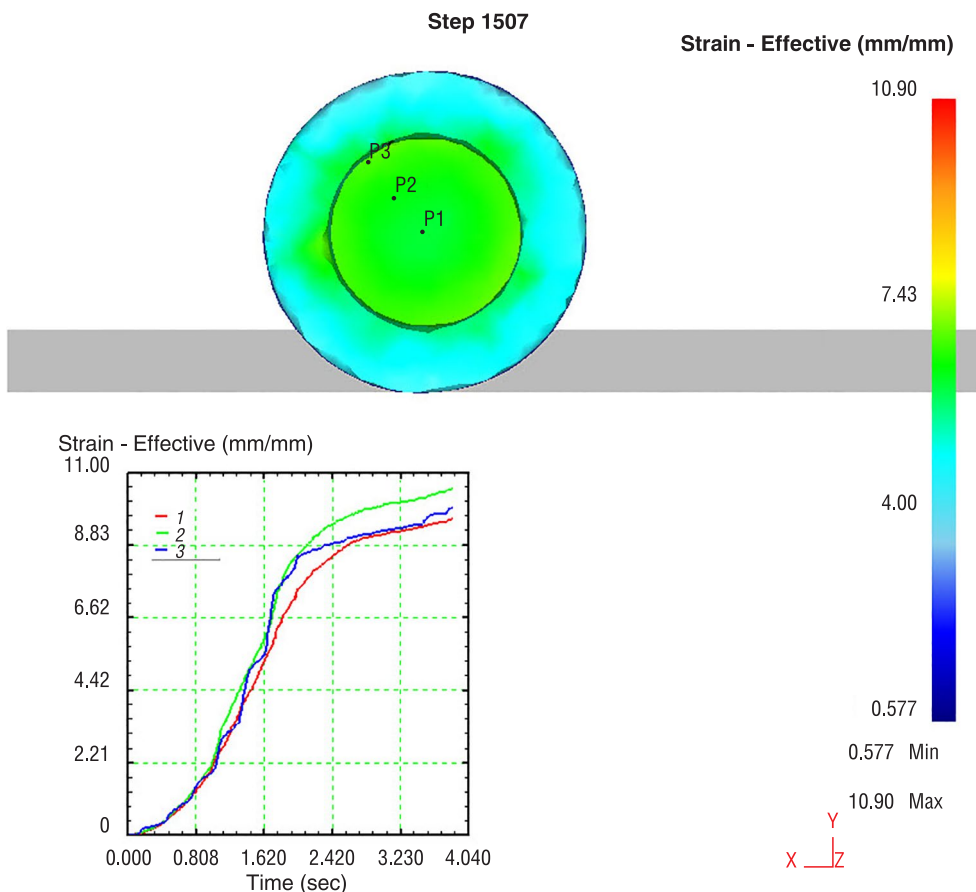


Рис. 3. Расположение точек P1, P2, P3 в сечении вала водяного насоса из стали 45 и значения накопленных деформаций  $\Lambda^*$  в точках P1, P2, P3, полученные программой прогнозирования структуры конструкционной стали 45 в процессе поперечно-клиновой прокатки

Fig. 3. The location of points P1, P2, P3 in the cross section of the water pump shaft of steel 45 and the accumulated deformation values  $\Lambda^*$  at points P1, P2, P3, obtained by the program for predicting the structure of steel 45 in the cross-wedge rolling process

Под накопленными деформациями понимаем степень деформации сдвига  $\Lambda^*$  при немонотонных разнонаправленных процессах:

$$\Lambda^* = \int_0^t H dt, \quad (17)$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига,  $t$  – время.

Как видно из рис. 3, накопленные деформации в точках P1, P2, P3 за время прохождения ими очага деформаций приблизительно одинаковы.

Напряженное состояние в процессах пластического течения металла определено шестью компонентами тензора напряжений. В направлении главных осей тензора количество компонент снижается до трех:  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ . Таким образом, напряженное состояние минимально может быть описано

тремя значениями, два из которых независимы, третье связано с этими двумя условием пластичности. Авторами [7, 12] предложено описывать напряженное состояние двумя параметрами:

1) средним напряжением  $\sigma/K$ , где  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение (третья часть первого инварианта тензора напряжений  $1/3 J_1(D_\sigma)$ ),  $K$  – пластическая постоянная материала (положительное значение корня квадратного из второго инварианта девиатора напряжений  $+\sqrt{J_2(D_\sigma)}$ );

2) параметром третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ , где  $J_3(D_\sigma)$  – третий инвариант девиатора напряжений.

Рассчитанное методом конечных элементов напряженное состояние в точке в осевой области P1 и в точке в поверхностных слоях P3 за время прохождения ими очага деформации показано на рис. 4 и 5.

Среднее значение за время прохождения точкой P1 в осевой области очага деформации среднего напряжения  $\sigma/K$  равно 0,2428, параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  составляет  $-0,6764$ . Среднее значение за время прохождения точкой P3 в поверхностных слоях очага деформации среднего напряжения  $\sigma/K$  равно  $-0,5657$ , параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  составляет  $-0,5050$ .

Отметим, что среднее напряжение при переходе от точки в осевой области к точке в поверхностных слоях меняет знак: из растягивающего становится сжимающим. Параметр третьего инварианта девиатора напряжений при этом остается сжимающим, но несколько возрастает.

Рассчитанные по разработанной методике максимальные диапазоны значений разориентации зерен и размеры зерен в осевой области образца (точка P1) в начале и в конце прокатки показаны в виде гистограмм на рис. 6.

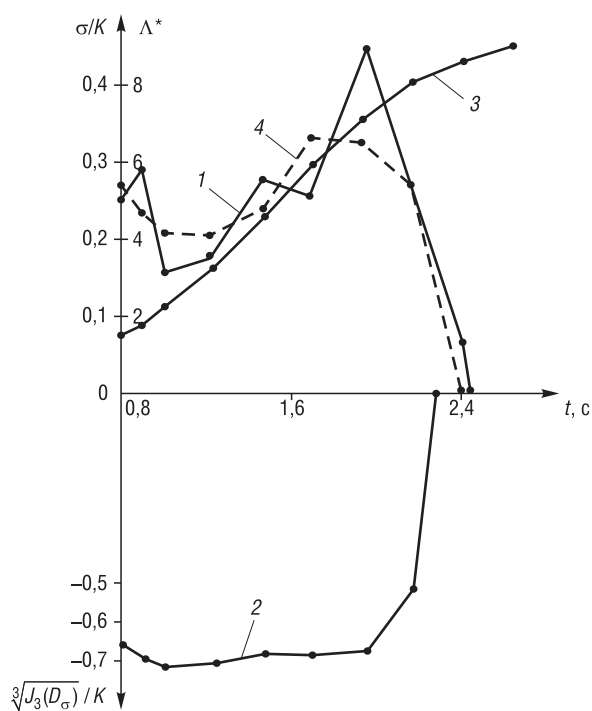


Рис. 4. Зависимости среднего напряжения  $\sigma/K$ , параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  и накопленных деформаций  $\Lambda^*$  от времени  $t$  в точке P1 (сталь 45, температура прокатки 1100 °C): 1 –  $\sigma/K$ , 2 –  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ , 3 –  $\Lambda^*$ , 4 –  $(\sigma/K)_{\text{срл}}$

Fig. 4. Dependences of the average stress  $\sigma/K$ , the parameter of the third invariant of the stress deviator  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  and the accumulated deformations  $\Lambda^*$  on the time  $t$  in the point P1 (steel 45, rolling temperature 1100 °C): 1 –  $\sigma/K$ , 2 –  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ , 3 –  $\Lambda^*$ , 4 –  $(\sigma/K)_{\text{срл}}$

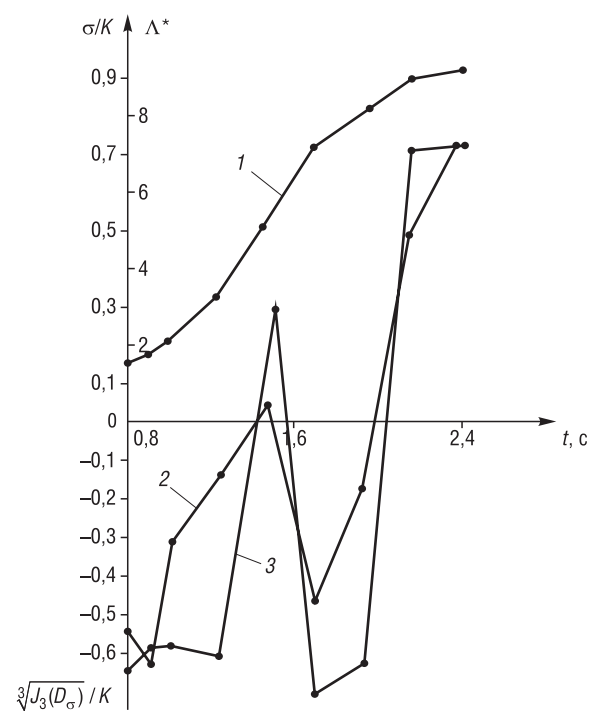


Рис. 5. Зависимости среднего напряжения  $\sigma/K$ , параметра третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  и накопленных деформаций  $\Lambda^*$  от времени  $t$  в точке P3 (сталь 45, температура прокатки 1100 °C): 1 –  $\sigma/K$ , 2 –  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ , 3 –  $\Lambda^*$ , 4 –  $(\sigma/K)_{\text{срл}}$

Fig. 5. Dependences of the average stress  $\sigma/K$ , the parameter of the third invariant of the stress deviator  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$  and the accumulated deformations  $\Lambda^*$  on the time  $t$  in the point P3 (steel 45, rolling temperature 1100 °C): 1 –  $\sigma/K$ , 2 –  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ , 3 –  $\Lambda^*$ , 4 –  $(\sigma/K)_{\text{срл}}$



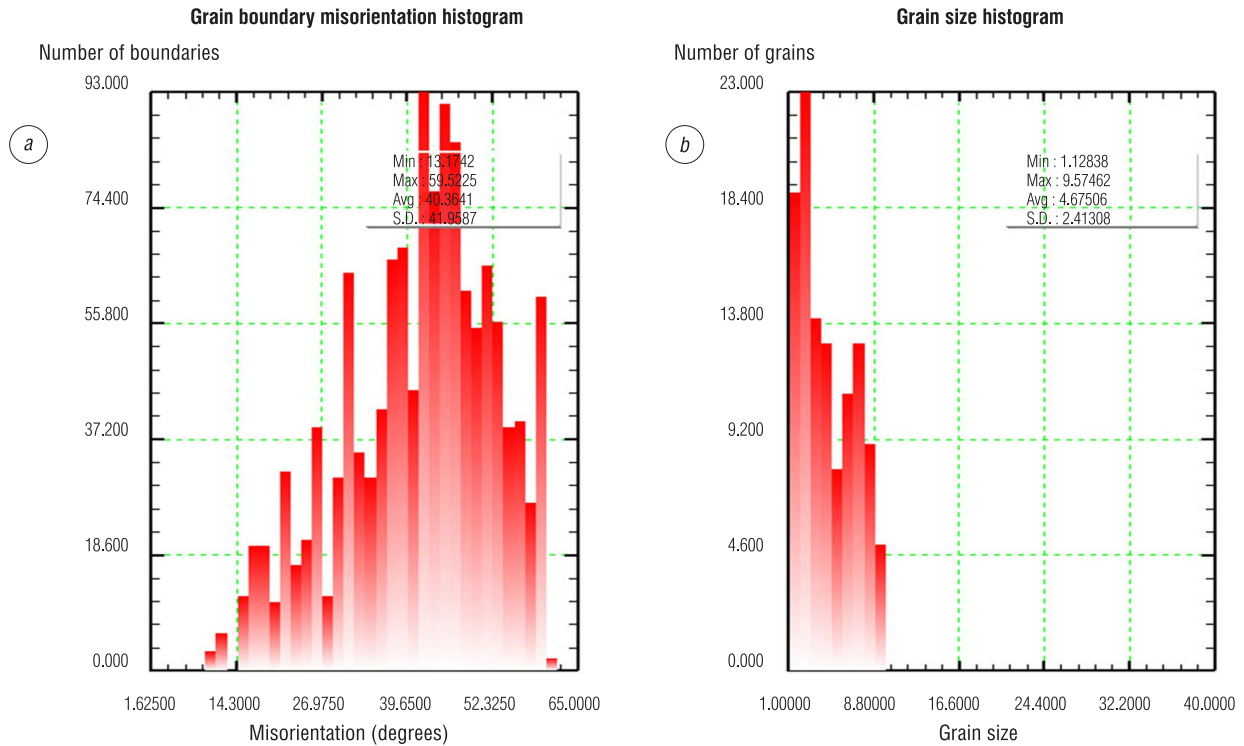


Рис. 6. Гистограммы разориентации (a) и размера зерен (b) в точке P1 в осевой области поковки вала водяного насоса из стали 45 в конце поперечно-клиновой прокатки

Fig. 6. Histograms of misorientation (a) and grain size (b) at point P1 in the axial region of the forging of the water pump shaft of steel 45 at the end of rolling

Результаты компьютерного моделирования границ зерен, плотности дислокаций и ориентации зерен в виде визуальных картинок (отсутствуют количественные значения) в осевой области вала водяного насоса показаны на рис. 7.

Результаты расчета параметров структуры металла, напряженно-деформированного состояния в начале и в конце прокатки в точках в осевой области и в поверхностных слоях детали приводятся в таблице.

**Параметры структуры металла и напряженно-деформированного состояния**  
**The metal structure and the stress-strain state parameters**

$\frac{\Delta d_m}{\Lambda^*}$ , мкм	Параметры		$\Lambda^*$	$(\sigma/K)_{cp}$	$(\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K)_{cp}$	$\delta_{max}$ , °	$d_m$ , мкм	$U_{усл}$ , °·мкм	$\frac{\Delta U_{усл}}{\Lambda^*}$ , см/см <sup>3</sup>
2,29	Точка P1 в осевой области	В начале прокатки	1,38	0,2428	-0,6764	46,74	25,11	1620	66,65
		В конце прокатки	8,91			53,08	4,68	2213	
2,11	Точка P3 в поверхностных слоях	В начале прокатки	1,42	-0,5657	-0,5050	42,12	25,12	1577	33,77
		В конце прокатки	9,06			34,53	6,02	1883	

Используя зависимости (2), (3), (12), (14), (15), (16) и с учетом того, что среднее значение вектора Бюргера во всех субзернах объема 1 см<sup>3</sup> равно  $\sum b/B \cdot n \cdot m$ , где  $B$  – нормирующий множитель, а также что  $D = d_m/n$ , определим условную плотность дислокаций  $U_{усл}$ :

$$U_{усл} = \delta_{max} \cdot d_m \cdot \Lambda, \text{ мкм.} \tag{18}$$

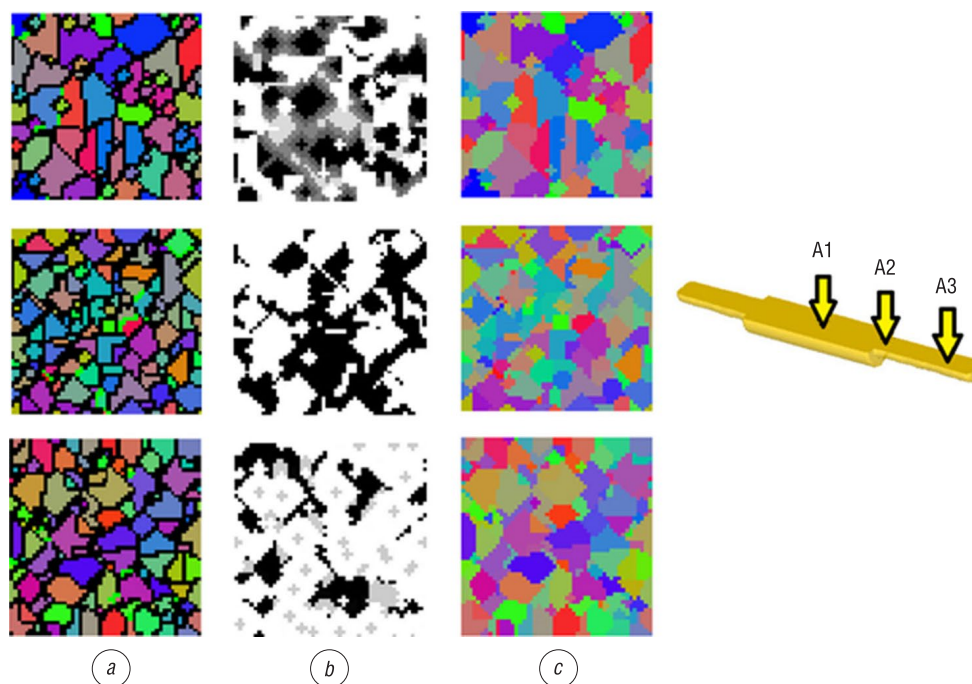


Рис. 7. Результаты компьютерного моделирования микроструктуры в точках A1, A2 и A3 в осевой области поковки вала водяного насоса из стали 45 в конце прокатки: ориентация зерна, их границы (a), плотность дислокаций (b), ориентация зерен (c)

Fig. 7. The results of the computer simulation of the microstructure at points A1, A2 and A3 in the axial region of the water pump shaft of steel 45 at the end of rolling: grain orientation, their boundaries (a), dislocation density (b), grain orientation (c)

Плотность дислокаций  $U$  так же, как и условная плотность дислокаций  $U_{\text{усл}}$ , увеличивается с возрастанием накопленных деформаций, меж тем размер зерна  $d_m$  с ростом накопленных деформаций уменьшается. Для оценки интенсивности указанных изменений вводятся понятия: удельный рост условной плотности дислокаций

$$\frac{\Delta U_{\text{усл}}}{\Lambda} = \frac{U_{\text{усл-конеч}} - U_{\text{усл-начал}}}{\Lambda}, \quad (19)$$

удельное снижение размера зерна

$$\frac{\Delta d_m}{\Lambda} = \frac{d_{m\text{-начал}} - d_{m\text{-конеч}}}{\Lambda}. \quad (20)$$

Значения (19), (20) для приведенного примера расчета структуры металла даны в таблице. Анализ этих значений показывает, что уменьшение среднего напряжения  $\sigma/K$  с 0,2428 по  $-0,5657$  (то есть переход от растягивающих напряжений к сжимающим) и одновременное увеличение показателя третьего инварианта девиатора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)} / K$  от  $-0,6764$  до  $-0,5050$  (что соответствует снижению сжимающих напряжений) увеличивает рост условной плотности дислокаций  $U_{\text{усл}}$  и, соответственно, плотности дислокаций, а также ускоряет уменьшение размеров зерна материала.

Эффект влияния напряженного состояния при пластическом течении металла на структуру деформированного металла обнаружен впервые.

Для подтверждения обнаруженного эффекта авторами проведен физический эксперимент с прокаткой стали 45 по указанным выше условиям процесса. Из прокатанных деталей были вырезаны образцы и на оптическом микроскопе в соответствии с ГОСТ 5639–82 определены средние диаметры зерен металла  $d_m$  в осевой области детали и в поверхностных слоях до прокатки и после. В итоге установлено, что удельное уменьшение размера (20) зерен феррита составило в поверхностном слое детали 1,54 мкм, в осевой области – 1,94 мкм. Удельное уменьшение размера зерен феррита и перлита составило в поверхностном слое 2,21 мкм, в осевой области – 2,49 мкм.

Таким образом, экспериментально установлено, что при поперечно-клиновой прокатке стали 45 с температурой нагрева заготовки 1100 °С уменьшение размера зерен феррита в осевой области детали на 20,2 % больше, чем в поверхностных слоях детали; уменьшение размера зерен феррита и перлита на 11,2 % больше.

В итоге физический эксперимент подтвердил компьютерный прогноз, что снижение среднего напряжения с одновременным увеличением показателя третьего инварианта девиатора напряжений сопровождается ускоренным уменьшением размеров зерна.

**Заключение.** Методом компьютерного моделирования выявлены закономерности формирования параметров структуры металла в зависимости от напряженного состояния. Впервые разработан аппарат компьютерного прогнозирования характеристик микроструктуры конструкционных сталей: ориентации и размеров зерен, плотности дислокаций при горячей поперечно-клиновой прокатке.

Установлено влияние напряженного состояния на значения разориентации зерен и размеров зерен при горячей пластической деформации. Определена закономерность, устанавливающая, что при снижении среднего напряжения и увеличении параметра третьего инварианта девиатора напряжений в очаге деформации в процессах горячей обработки металлов давлением конструкционных сталей ускоряется рост плотности дислокаций, увеличивается количество зарождающихся зерен металла и, как следствие, в большей степени осуществляется уменьшение среднего размера зерен металла.

Созданная компьютерная модель прогнозирования характеристик структур металла в зависимости от режимов пластической деформации обеспечивает при минимальных затратах и без проведения натуральных экспериментов нахождение оптимальных термодинамических и напряженно-деформированных режимов пластического течения металла, гарантирующих наивысшие эксплуатационные свойства получаемых изделий. Практическая значимость исследования заключается в расширении возможностей оптимизации технологий обработки металлов, улучшении качества продукции, полученной методом обработки металлов давлением, и повышении ее конкурентоспособности.

### Список использованных источников

1. Кожевникова, Г.В. Повышение усталостной прочности валов посредством поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова, А.О. Рудович, В.Я. Шукин // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2017. – № 12. – С. 19–31.
2. Пластичность и разрушение / под общ. ред. В.Л. Колмогорова. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.
3. Качанов, Л.М. Основы механики разрушения / Л.М. Качанов. – М.: Наука, 1974. – 312 с.
4. Бернштейн, М.Л. Структура деформированных металлов / М.Л. Бернштейн. – М.: Металлургия, 1977. – 431 с.
5. Задоян, Д.М. Определение плотности избыточных дислокаций по рентгенографическим оценкам размеров кристаллических блоков и разориентированных границ / Д.М. Задоян, Л.А. Азизбекян, М.К. Валуженич // Вестн. Самар. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки. – 2003. – Вып. 19. – С. 177–179.
6. Абрамов, А.А. Использование пакета LS-DYNA для компьютерного моделирования процесса поперечно-клиновой прокатки / А.А. Абрамов, Г.В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2011. – № 2. – С. 41–50.
7. Кожевникова, Г.В. Теоретические и технологические основы поперечно-клиновой прокатки заготовок из сталей с ограниченной пластичностью: дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.07 / Г.В. Кожевникова. – Минск, 2015. – 430 л.
8. Kozhevnikova, G. Cross-wedgerolling / G. Kozhevnikova. – Minsk: Belorusskaya nauka, 2012. – 321 p.
9. Астапчик, А.С. Исследование пластичности металла заготовок поперечно-клиновой прокатки / А.С. Астапчик, Г.В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2014. – № 3. – С. 31–36.
10. Кожевникова, Г.В. Теория и практика поперечно-клиновой прокатки / Г.В. Кожевникова. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 291 с.
11. Кожевникова, Г.В. Решение задачи гибки листа методом полей линий скольжения / Г.В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 416–423. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-416-423>
12. Шукин, В.Я. Белорусская школа поперечно-клиновой прокатки / В.Я. Шукин, Г.В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 43–50.
13. Кожевникова, Г.В. Исследование кинематики течения металла при поперечно-клиновой прокатке с использованием компьютерного моделирования / Г.В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2013. – № 1. – С. 47–53.
14. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учеб. пособие / В.С. Паршин [и др.]. – Екатеринбург: УрФУ. – 2010. – 266 с.

## References

1. Kozhevnikova G. V., Rudovich A. O., Shchukin V. Y. Improving of Fatigue Strength by Cross-wedge Rolling. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem = Forging and Stamping Production. Material Working by Pressure*, 2017, no. 12, pp. 19–31 (in Russian).
2. Kolmogorov V. L., Bogatov A. A., Migachev B. A. [et al.] *Plasticity and Destruction*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 336 p. (in Russian).
3. Kachanov L. M. *Fundamentals of Fracture Mechanics*. Moscow, Nauka Publ., 1974. 312 p. (in Russian).
4. Bernstein M. L. *Structure of Deformed Metals*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 431 p. (in Russian).
5. Zadoyan D. M., Azizbekyan L. A., Valyujenich M. K. Determination of the density of excess dislocations using radiographic estimates of the size of crystal blocks and misorientation of small-angle boundaries. *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Fiziko-matematicheskie nauki = Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences*, 2003, issue 19, pp. 177–179 (in Russian).
6. Abramov A. A., Kozhevnikova G. V. Use of LS-DYNA for computer modeling of cross-wedge rolling process. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2011, no. 2, pp. 41–50 (in Russian).
7. Kozhevnikova G. V. *Theoretical and Technological Basics of Cross-Wedge Rolling of Billet Made of Restricted Plasticity Steels*. Minsk, 2015. 430 p. (in Russian).
8. Kozhevnikova G. *Cross-Wedge Rolling*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2012. 321 p.
9. Astapchik S. A., Kozhevnikova G. V. Study of metal plasticity of billets processed by cross-wedge rolling. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2014, no. 3, pp. 31–36 (in Russian).
10. Kozhevnikova G. V. *Theory and Practice of Cross-Wedge Rolling*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 291 p. (in Russian).
11. Kozhevnikova G. V. Solution of the problem of sheet bending by the slip line field method. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 416–423 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-416-423>
12. Shchukin V. Y., Kozhevnikova G. V. Belarusian cross-wedge rolling school of thought. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 43–50 (in Russian).
13. Kozhevnikova G. V. Analysis of metal flow kinematics under cross-wedge rolling using computer simulation. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2013, no. 1, pp. 47–53 (in Russian).
14. Parshin B. C., Karamyshev A. P., Nekrasov I. I., Pugin A. I., Fedulov A. A. *Practical Guide to the DEFORM-3D Software Package*. Yekaterinburg, Ural Federal University, 2010. 266 p. (in Russian).

## Информация об авторах

*Кожевникова Гражина Валерьевна* – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории предельной деформируемости и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fti@tut.by

*Абрамов Андрей Андреевич* – научный сотрудник лаборатории предельной деформируемости и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: an.aj@ya.ru

*Климов Кирилл Александрович* – научный сотрудник лаборатории предельной деформируемости и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: klim1984@gmail.com

## Information about the authors

*Grazhina V. Kozhevnikova* – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher of the Laboratory of Extreme Deformability and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fti@tut.by

*Andrei A. Abramov* – Researcher of the Laboratory of Extreme Deformability and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: an.aj@ya.ru

*Kirill A. Klimov* – Researcher of the Laboratory of Extreme Deformability and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: klim1984@gmail.com

П. Н. Громько, С. Н. Хатетовский, И. В. Трусов

*Белорусско-Российский университет, Могилев, Республика Беларусь*

## ВЛИЯНИЕ ПРОФИЛЯ ЗУБЬЕВ НА ПОГРЕШНОСТЬ ВРАЩЕНИЯ САТЕЛЛИТА ПЕРЕДАЧ ЭКСЦЕНТРИКОВОГО ТИПА

**Аннотация.** Рассматривается циклоидальное внутреннее зацепление колес, которые образуют эксцентриковую передачу. Исследуется нечувствительность этого типа зацепления к погрешности сборки. Рассматривается один вид погрешности сборки – погрешность межцентрового расстояния, то есть эксцентриситета. Показано, что работоспособность передачи при наличии погрешности межцентрового расстояния обеспечивается при условии уменьшения диаметра ролика, выступающего в качестве зуба центрального колеса. Уменьшение диаметра ролика и погрешность межцентрового расстояния приводят к нарушению условия сопряженности колес эксцентриковой передачи, что в свою очередь обуславливает погрешность вращения выходного звена. Выходное звено и механизм передачи на него вращения в статье не рассматриваются. Таким образом, погрешность вращения ролика принимается равной погрешности вращения сателлита эксцентриковой передачи. Проведена оценка влияния профиля зубьев на погрешность вращения сателлита передач эксцентрикового типа при наличии погрешности межцентрового расстояния. На основе матричной кинематики разработана методика, которая учитывает многопарность зацепления. На базе разработанной методики проведены исследования влияния профилей зубьев сателлита, сформированных на основе укороченной и удлиненной эпициклоид, на погрешность вращения. Установлено, что применение в зацеплении эксцентриковой передачи профилей зубьев сателлита, сформированных на основе удлиненной эпициклоиды, позволяет снизить погрешность вращения. При этом становится возможным изготовление эксцентриковых передач в условиях производств общего машиностроения. Таким образом, появляется возможность расширения области применения эксцентриковых передач приводными устройствами, к которым предъявляются повышенные требования по габаритным размерам, массе, а также себестоимости изготовления.

**Ключевые слова:** погрешность вращения, эксцентриковая передача, профиль зуба, удлиненная эпициклоида, укороченная эпициклоида

**Для цитирования:** Громько, П. Н. Влияние профиля зубьев на погрешность вращения сателлита передач эксцентрикового типа / П. Н. Громько, С. Н. Хатетовский, И. В. Трусов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 445–452. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-445-452>

Petr N. Gromyko, Stanislav N. Khatetovsky, Igor V. Trusov

*Belarusian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus*

## INFLUENCE OF TOOTH PROFILE ON ROTATION ERROR OF ECCENTRIC GEARING SATELLITE

**Abstract.** In the article a cycloid internal engagement of gears that form an eccentric gearing, is considered. This engagement is investigated in point of insensitivity to assembly error. Only one type of assembly error – error of center distance i. e. eccentricity – is considered. It is expanded that workability of gearing with center distance error is provided on the assumption of decrease of diameter of roller that acts as central gear tooth. Roller diameter decrease and center distance error lead to breach of condition of conjugation of gears of eccentric gearing that in turn governs the output member rotation error. The output member and rotation transmission mechanism are not considered. Thus output member rotation error is equated to rotation error of eccentric gearing satellite. The influence of tooth profile on rotation error of eccentric gearing satellite is estimated when center distance error. On the base of matrix kinematic the methodology that takes in account the multiple-tooth contact is worked out. On basis of the developed methodology the research of influence of satellite tooth profiles formed on the base of shortened and extended epicycloids on rotation error is carried out. It is determined that in the eccentric gearing the use of satellite tooth profiles, formed on the base of extended epicycloid, makes it possible to decrease the rotation error. At that makes possible the operation of eccentric gearing in general manufacturing settings. Thus, the possibility of extending of eccentric gearing application fields to driving devices with higher requirements to overall sizes, mass, as well as cost, is come.

**Keywords:** rotation error, eccentric gearing, tooth profile, extended epicycloid, shortened epicycloid

**For citation:** Gromyko P. N., Khatetovsky S. N., Trusov I. V. Influence of tooth profile on rotation error of eccentric gearing satellite. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 445–452 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-445-452>

**Введение.** Передачи эксцентрикового типа – это передачи, на основе которых возможно создание компактных малогабаритных конструкций приводных устройств различного назначения [1]. Однако высокий уровень служебных свойств у передач данного типа достигается при условии высокоточного изготовления и монтажа их звеньев, что требует использования специальных оборудования, технологической оснастки, материалов и методов химико-термической обработки. Расширить применение передач эксцентрикового типа возможно за счет снижения влияния на их основные эксплуатационные характеристики погрешностей изготовления и монтажа. К наиболее важным эксплуатационным характеристикам механических передач, определяющим уровень их служебных свойств, можно отнести КПД и точность вращения выходного звена. В [2] приведены результаты исследований по оценке КПД эксцентриковых передач при наличии указанных выше погрешностей и сделан вывод, что снижение значений механических потерь в зацеплении возможно на основе применения специальных профилей зубьев контактирующих колес. Однако при этом вопросы влияния профиля зубьев сателлита на точность вращения выходного звена ранее не рассматривались.

Поэтому целью данной работы является разработка методики и проведение исследований влияния формы зубьев на точность вращения выходного звена передач эксцентрикового типа.

**Методика оценки точности вращения выходного звена передач эксцентрикового типа.** Предлагается рассмотреть погрешность вращения выходного звена, основной причиной возникновения которой являются неточности при монтаже звеньев.

Указанная погрешность  $\delta\varphi_i$  в некоторый момент характеризуется разностью между действительным и расчетным значениями угла поворота ведомого звена:

$$\delta\varphi_i = \varphi_{di} - \varphi_{pi}, \quad (1)$$

где  $\varphi_{di}$  – действительный угол поворота ведомого звена в момент времени измерения,  $\varphi_{pi}$  – расчетный угол поворота ведомого звена в момент времени измерения.

Значения расчетного угла поворота ведомого звена определяются исходя из числа оборотов  $n_1$ , совершенных входным валом за время исследования, и количеством измерений  $N$  за этот период:

$$\varphi_{pi} = \frac{2\pi \cdot n_1 \cdot i}{u \cdot N}, \quad (2)$$

где  $u$  – передаточное отношение передачи;  $i$  – номер конкретного измерения,  $i = 1, \dots, N$ .

Погрешность вращения выходного звена может быть рассчитана как разность между максимальным и минимальным значениями  $\delta\varphi_i$ , определяемыми из всего ряда значений, полученных за время исследования.

Для определения погрешности вращения выходного звена в момент времени измерения, выраженной в угловых единицах, обратимся к структурной схеме эксцентриковой передачи, изображенной на рис. 1, а.

Данная эксцентриковая передача работает следующим образом. Вращающийся входной вал 1 с жестко закрепленным на нем эксцентриком 2 приводит в плоскопараллельное движение сателлит 3 благодаря взаимодействию наружных зубьев сателлита 3 с неподвижными роликами 4. Вращательная составляющая плоскопараллельного движения сателлита 3 вокруг оси его вращения может быть передана на выходное звено различными способами, например с помощью механизма параллельных кривошипов.

Так как целью проводимых исследований было изучение влияния формы профилей зубьев сателлита 3 на основные эксплуатационные характеристики эксцентриковой передачи, то погрешности вращения выходного звена, возникающие из-за неточностей сборки механизма параллельных кривошипов, в данной работе не учитывались. Поэтому в схемах эксцентриковой передачи, изображенных на рис. 1, механизм параллельных кривошипов не показан, а погрешность вращения выходного звена принята равной погрешности вращения сателлита.

Как уже упоминалось, даже при точном монтаже механических передач в условиях специализированных производств неизбежно возникновение различных погрешностей, численное значение которых определяется многими технологическими факторами. Как показали исследования,

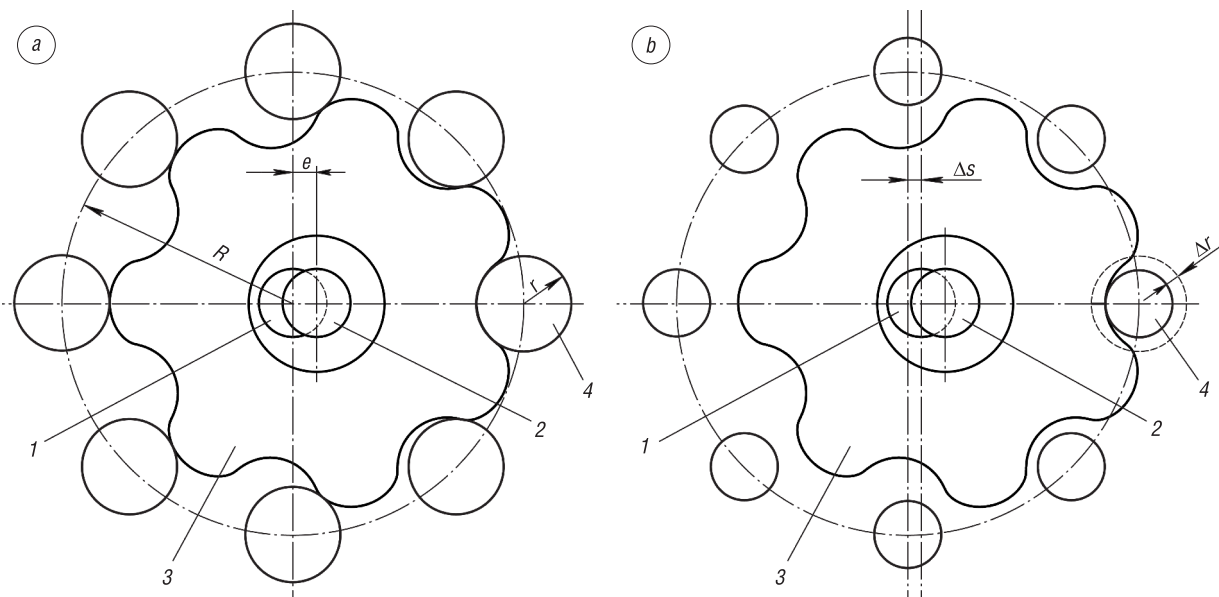


Рис. 1. Структурная схема эксцентриковой передачи: *a* – без погрешности монтажа, *b* – при наличии погрешности смещения осей  $\Delta s$  и компенсирующего зазора  $\Delta r$

Fig. 1. Structural scheme of eccentric gearing: *a* – without assembly error, *b* – at presence of offset error of axes  $\Delta s$  and compensative clearance  $\Delta r$

результаты которых отражены в [3], одной из основных погрешностей, существенно влияющей на эксплуатационные показатели эксцентриковой передачи, является погрешность  $\Delta s$ , вызванная смещением оси неподвижного центрального колеса 4 относительно оси вращения входного вала 1 (рис. 1, *b*). Назовем ее погрешностью смещения оси. Наиболее простым способом компенсации указанной погрешности, обеспечивающим работоспособность эксцентриковой передачи, является создание компенсирующего зазора  $\Delta r$  в зацеплении за счет уменьшения радиуса роликов 4 по сравнению с начальным радиусом ролика  $r$ , при котором было произведено формообразование профиля зубьев сателлита 3.

В основу методики определения погрешности вращения сателлита положены параметрические уравнения профиля его зубьев, которые приведены в разных вариантах в [4, 5]. Эти параметрические уравнения позволяют с заданной дискретностью шага получить матрицу  $M_1$  массива координат точек профиля зубьев сателлита в системе координат  $x_1y_1$ , начало отсчета которой лежит на оси вращения сателлита:

$$M_1 = \begin{bmatrix} x_{1...} \\ y_{1...} \\ 1... \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Матрица координат точек  $M_1$  может быть преобразована с помощью матрицы поворота  $T_1$  в массив точек, повернутых в системе координат  $x_1y_1$  относительно начала отсчета на угол  $\varphi_{pi} - \Delta\varphi_j$  (рис. 2, *a*):

$$T_1 = \begin{bmatrix} \cos(\varphi_{pi} - \Delta\varphi_j) & -\sin(\varphi_{pi} - \Delta\varphi_j) & 0 \\ \sin(\varphi_{pi} - \Delta\varphi_j) & \cos(\varphi_{pi} - \Delta\varphi_j) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \tag{4}$$

где  $\Delta\varphi_j$  – элементарный угол доворота сателлита.

При вращении входного вала 1 (рис. 2, *b*) изменяется положение начала отсчета системы координат  $x_1y_1$ , совпадающее с центром сателлита 3. Матрица  $T_2$  позволяет осуществлять пересчет координат точек матрицы  $T_1 \times M_1$  с учетом изменения положения центра сателлита относительно оси вращения входного вала 1 при его повороте на дискретный угол  $\varphi_{pi} \cdot u$ :

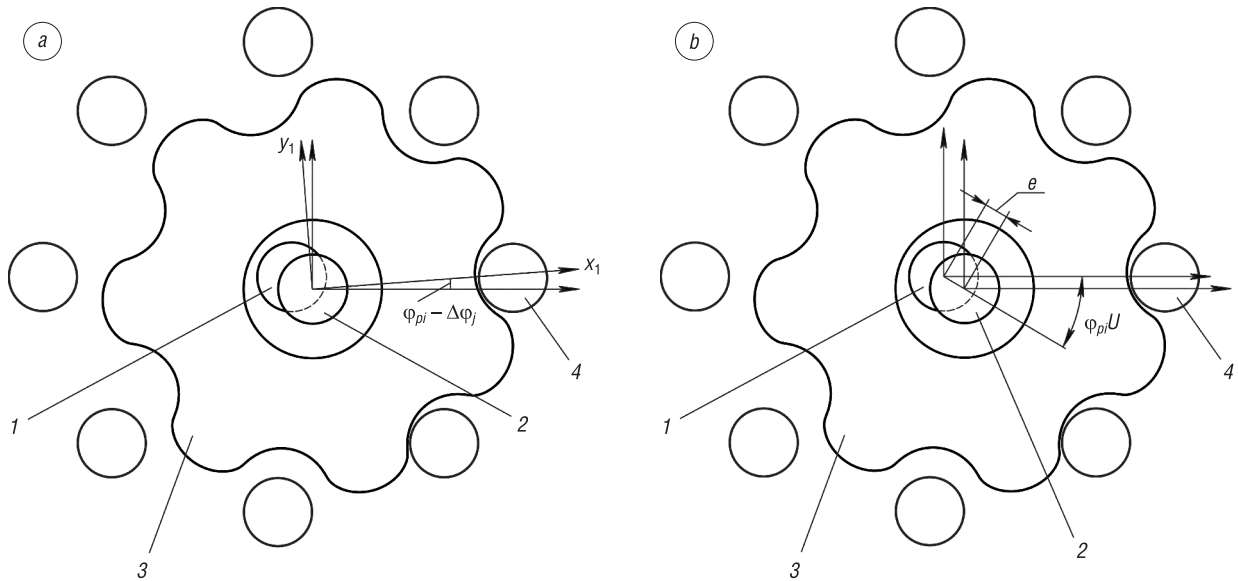


Рис. 2. Схемы расчета координат точек профиля зубьев сателлита: *a* – с учетом поворота осей относительно центра вращения сателлита, *b* – с учетом изменения координат центра сателлита при повороте входного вала

Fig. 2. Schemes of calculation of coordinates of satellite tooth profile points: *a* – with regard to turning of axes about the satellite revolution center, *b* – with regard to change of coordinates of the satellite center after the input shaft turning

$$T_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & e \cdot \cos(\varphi_{pi} \cdot u) \\ 0 & 1 & e \cdot \sin(\varphi_{pi} \cdot u) \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Для учета погрешности смещения осей  $\Delta s$  необходимо произвести с помощью матрицы  $T_3$  перерасчет точек профиля зубьев сателлита путем определения нового центра системы координат (рис. 3, *a*):

$$T_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \Delta s \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Таким образом, в результате описанных преобразований исходной матрицы  $M_1$  массива координат точек  $x_{1i}, y_{1i}$  профиля зубьев сателлита может быть получена матрица  $T_3 \times T_2 \times T_1 \times M_1$  с массивом точек профиля зубьев сателлита при определенном значении расчетного угла поворота ведомого звена  $\varphi_{pi}$ , при заданной погрешности смещения осей  $\Delta s$ , а также обеспечивающая возможность поворота начального массива точек  $M_1$  относительно оси вращения сателлита на элементарный угол доворота  $\Delta\varphi_j$ .

Дальнейшие преобразования массива  $T_3 \times T_2 \times T_1 \times M_1$  координат точек профиля зубьев сателлита 3 заключаются в их перерасчете относительно систем координат, связанных с центрами окружностей каждого ролика. С помощью матрицы  $T_{4k}$  осуществляют пересчет точек массива с учетом переноса начала отсчета системы координат последовательно в центр каждого из роликов 4 (рис. 3, *b*):

$$T_{4k} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -R \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{z_4} \\ 0 & 1 & -R \cdot \sin \frac{2 \cdot \pi \cdot k}{z_4} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

где  $z_4$  – число роликов;  $k$  – номер каждого ролика,  $k = 0, \dots, z_4 - 1$ .



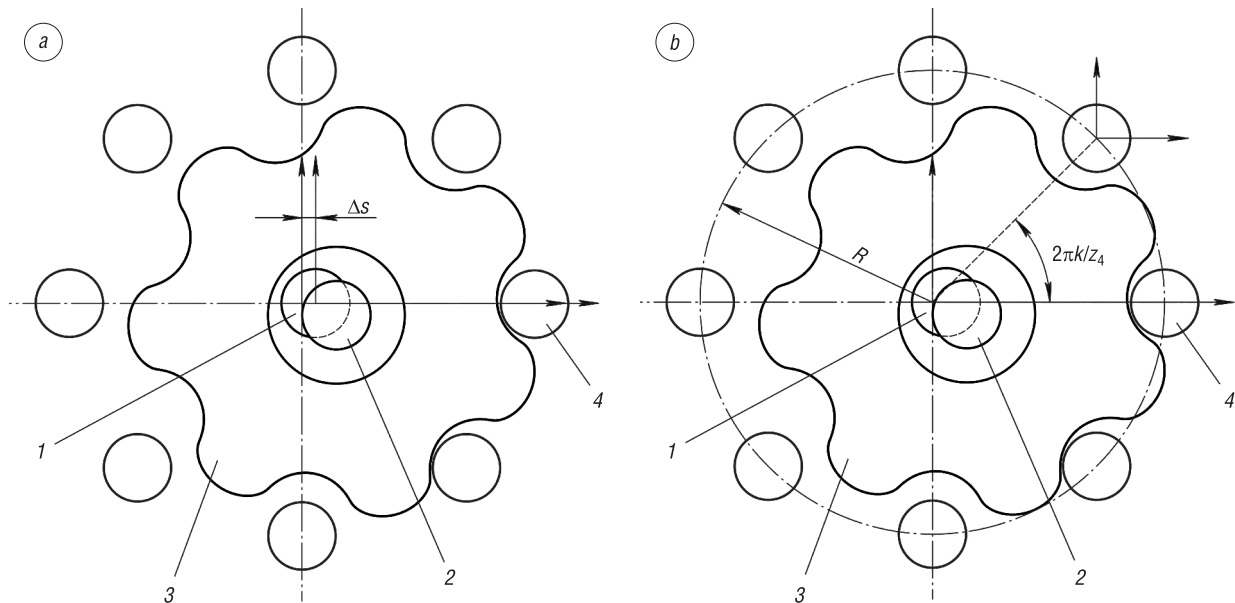


Рис. 3. Схемы расчета координат точек профиля зубьев сателлита: *a* – с учетом смещения осей  $\Delta s$ , *b* – с учетом переноса начала отсчета системы координат в центр каждого из роликов  
 Fig. 3. Schemes of calculation of coordinates of the satellite tooth profile points: *a* – with regard to axes offset  $\Delta s$ , *b* – with regard to translating of coordinate system origin at center of each roller

В результате имеется  $k$  массивов точек координат одного и того же профиля зубьев сателлита  $M_{1k} = T_{4k} \times T_3 \times T_2 \times T_1 \times M_1$  относительно систем координат, жестко связанных с центром каждого из роликов 4.

Наличие компенсирующего зазора  $\Delta r$  в зацеплении в исходном положении звеньев эксцентриковой передачи приводит к отсутствию контакта между зубьями сателлита 3 и роликами 4. Для создания контактного взаимодействия между поверхностью одного из зубьев сателлита 3 с ближайшей к нему поверхностью одного из роликов 4 необходимо сателлиту 3 из положения 5 совершить доворот вокруг оси своего вращения в направлении, противоположном вращению сателлита 3 (рис. 4, *a*). Угол доворота, обеспечивающий контактное взаимодействие профиля зубьев сателлита 3 с поверхностью одного из роликов 4, будет являться погрешностью вращения выходного звена в момент времени измерения.

Описанные матричные преобразования позволяют преобразовывать начальный массив  $M_1$  в указанные массивы координат точек с учетом углового положения входного вала 1, а также доворачивать сателлит на дискретный угол  $\Delta\varphi_j$  (см. рис. 2, *a*) до тех пор, пока не будет соблюдено условие (рис. 4, *b*)

$$x_{1k}^2 + y_{1k}^2 - (r - \Delta r)^2 \leq 0. \quad (8)$$

При несоблюдении указанного условия контакт между профилем зубьев сателлита 3 и поверхностью роликов 4 не происходит. Многократный последовательный поворот кривой профиля зубьев сателлита 3 на элементарный угол доворота  $\Delta\varphi_j$  приведет к пересечению кривой этого профиля с окружностью одного или нескольких роликов 4. Указанное пересечение может быть трактовано как контактное взаимодействие между поверхностью зубьев сателлита 3 с неподвижными роликами 4.

Погрешность вращения сателлита в момент измерения определяется с помощью следующего выражения:

$$\delta\varphi_i = \Delta\varphi \cdot j, \quad (9)$$

где  $j$  – число доворотов профиля зубьев сателлита до установления факта пересечения указанного профиля с окружностью одного или нескольких роликов 4.

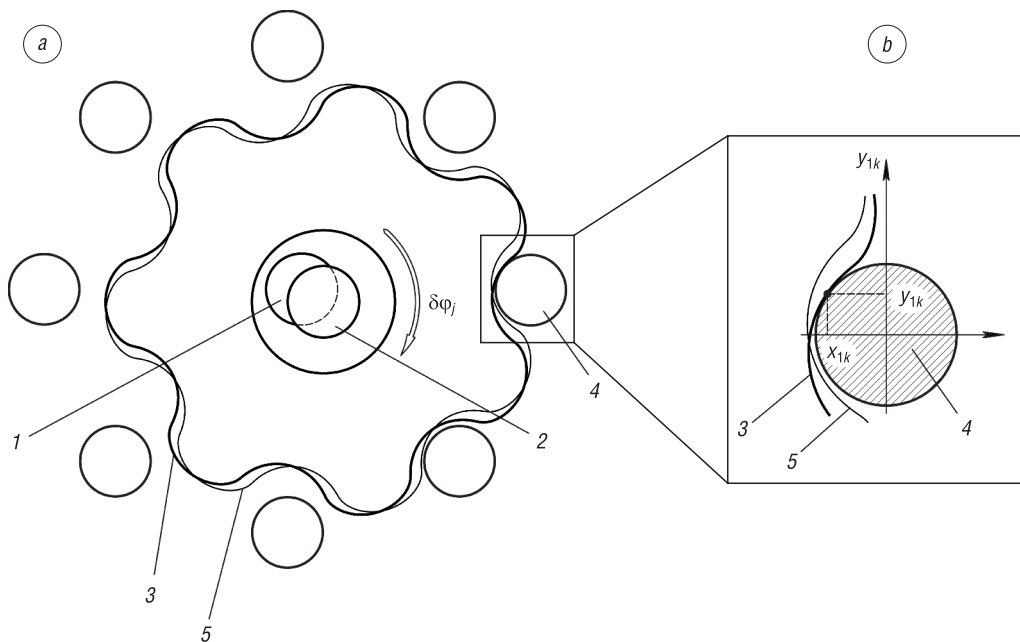


Рис. 4. Схемы определения погрешности вращения сателлита: *a* – определение угла доворота сателлита, обеспечивающего контактное взаимодействие в момент времени измерения; *b* – определение условия контактного взаимодействия профиля зубьев сателлита 3 с окружностью ролика 4

Fig. 4. Schemes of determination of satellite rotation error: *a* – determination of satellite additional turn ensuring contact at the moment of measuring; *b* – determining of condition of contact of satellite tooth profile 3 and circle of roller 4

**Результаты исследований влияния профиля зубьев на погрешность вращения сателлита передач эксцентрикового типа.** С процессами формообразования профилей зубьев сателлита эксцентриковых передач можно ознакомиться в [6], где отмечено, что формообразование профиля зубьев сателлита 3 может осуществляться на основе использования укороченной и удлиненной эпициклоиды. В случае использования укороченной эпициклоиды процесс формообразования происходит при меньших значениях эксцентриситета  $e$  (см. рис. 1), чем при значении, при котором

формируется профиль зуба на основе удлиненной эпициклоиды (рис. 5), при сохранении одинаковыми всех остальных параметров зацепления. К таким параметрам следует отнести число зубьев  $z_3$  сателлита 3, число роликов  $z_4$ , определяемое как  $z_3 + 1$ , а также радиус  $R$ , на котором расположены центры роликов относительно оси вращения входного вала 1.

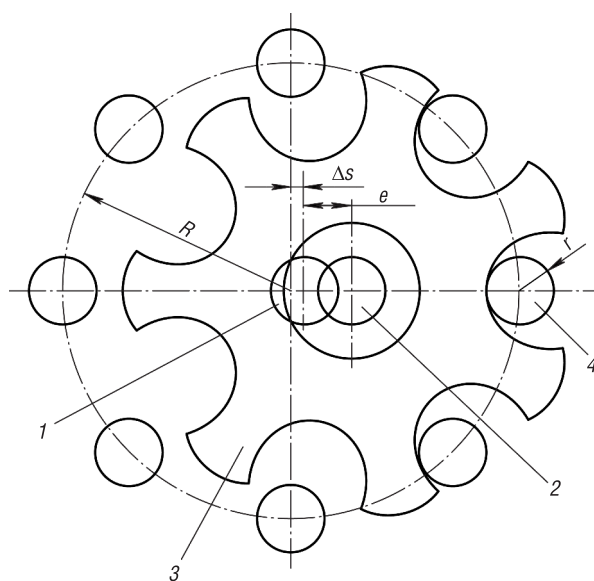


Рис. 5. Схема эксцентриковой передачи, профиль зубьев сателлита которой получен на основе удлиненной эпициклоиды

Fig. 5. Scheme of eccentric gearing, the tooth profile of satellite, which is based of extended epicycloid

Исходя из предложенной в данной работе методики была разработана программа для определения погрешности вращения сателлита при наличии погрешностей смещения осей  $\Delta s$  и компенсирующего зазора  $\Delta r$  в зацеплении. С ее помощью были проведены исследования, целью которых было определение влияния на рассматриваемую погрешность формы профилей зубьев сателлита. Результаты исследований показаны на рис. 6 в виде графических зависимостей.

На основе данных графических зависимостей можно установить, что в эксцентриковой передаче, зубья сателлита которой получены с использованием укороченной эпициклоиды,

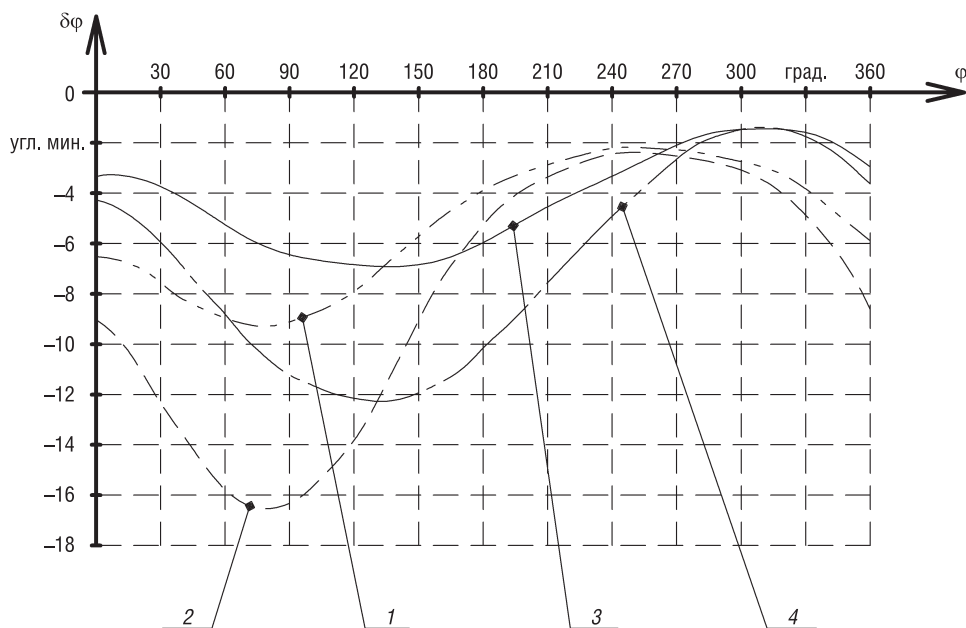


Рис. 6. Зависимости погрешности вращения сателлита от угла поворота входного вала при различных способах формообразования зубьев сателлита: 1 – укороченная эпициклоида,  $\Delta s = 0,05$  мм,  $\Delta r = 0,2$  мм; 2 – укороченная эпициклоида,  $\Delta s = 0,1$  мм,  $\Delta r = 0,2$  мм; 3 – удлиненная эпициклоида,  $\Delta s = 0,05$  мм,  $\Delta r = 0,2$  мм; 4 – удлиненная эпициклоида,  $\Delta s = 0,1$  мм,  $\Delta r = 0,2$  мм

Fig. 6. Dependencies of error of satellite turning on turning angle of input shaft for different ways of satellite tooth forming: 1 – shortened epicycloid,  $\Delta s = 0.05$  mm,  $\Delta r = 0.2$  mm; 2 – shortened epicycloid,  $\Delta s = 0.1$  mm,  $\Delta r = 0.2$  mm; 3 – extended epicycloid,  $\Delta s = 0.05$  mm,  $\Delta r = 0.2$  mm; 4 – extended epicycloid,  $\Delta s = 0.1$  mm,  $\Delta r = 0.2$  mm

при росте погрешности смещения осей от 0,05 мм до 0,10 мм погрешность вращения увеличивается от 7,2 до 14 угловых минут. В эксцентриковой передаче при формообразовании зубьев сателлита с использованием удлиненной эпициклоиды при росте в том же диапазоне погрешности смещения осей значения погрешности вращения возрастает от 5 до 10,7 угловых минут.

**Заключение.** Использование в зацеплении эксцентриковой передачи профилей зубьев сателлита, полученных на основе удлиненной эпициклоиды, снижает влияние погрешностей сборки на точность вращения ее выходного звена по сравнению с профилем, сформированным на основе укороченной эпициклоиды.

Следует отметить, что профили зубьев сателлита, сформированные на основе удлиненной эпициклоиды, были использованы при проектировании и изготовлении передач эксцентрикового типа, которые нашли практическое применение в приводных устройствах различного назначения [5, 7].

### Список использованных источников

1. Шанников, В. М. Планетарные редукторы с внецентроидным зацеплением / В. М. Шанников. – М.: Машгиз, 1948. – 172 с.
2. Gromyko, P.N. Modeling of eccentric transmission operation in presence of elastic deformations of contacting links / P.N. Gromyko, S.N. Khatetovsky // Proceedings of the International Conference “Aviamechanical Engineering and Transport” (AviaENT). – 2018. – Vol. 158. – P. 160–164. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.31>
3. Влияние погрешности звеньев прецессионной передачи на кинематическую погрешность / С. Н. Хатетовский [и др.] // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2017. – №4 – С. 109–117.
4. Литвин, Ф. Л. Теория зубчатых зацеплений / Ф. Л. Литвин. – М.: Наука, 1968. – 584 с.
5. Прецессионные редуцирующие механизмы для приводных устройств различного назначения / П. Н. Громько [и др.]. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – 273 с.
6. Громько, П. Н. Использование удлиненной эпициклоиды для формообразования зубчатых поверхностей передач эксцентрикового типа / П. Н. Громько, С. Н. Хатетовский, В. Л. Юркова // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2019. – № 1 (62). – С. 14–21.
7. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / В. Б. Альгин [и др.]; под общ. ред. В. Б. Альгина, В. Е. Старжинского. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 406 с.

## References

1. Shannikov V.M. *Planetary Gearboxes with Off-Centroid Gearing*. Moscow, Mashgiz Publ., 1948. 172 p. (in Russian).
2. Gromyko P. N., Khatetovsky S. N. Modeling of eccentric transmission operation in presence of elastic deformations of contacting links. *Proceedings of the International Conference "Aviamechanical Engineering and Transport" (AviaENT)*, 2018, vol. 158, pp. 160–164. <https://doi.org/10.2991/avent-18.2018.31>
3. Khatetovsky S. N., Gromyko P. N., Kalentionok R. A., Kapitonov A. V., Kotov I. V. The influence of errors of precessional gearing links on kinematic error. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2017, no. 4, pp. 109–117 (in Russian).
4. Litvin F.L. *Theory of Gearings*. Moscow, Nauka Publ., 1968. 584 p. (in Russian).
5. Gromyko P. N., Makarevich D. M., Dokonov L. G., Makarevich S. D., Goncharov P. S., Trusov I. V. *Precession Reduction Gearings for Driving Devices of Different Functions*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2013. 273 p. (in Russian).
6. Gromyko P. N., Khatetovsky S. N., Yurkova V. L. Use of an elongated epicycloide for forming gear surfaces of eccentric gears. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2019, no. 1 (62), pp. 14–21 (in Russian).
7. Al'gin V. B., Antonyuk V. E., Basinyuk V. L., Goman A. M., Gromyko P. N., Dan'kov A. M., Dragan A. V., Ishin N. N., Kane M. M. [et al.] *Gearings and Transmissions in Belarus: Design, Technology, Estimations of Properties*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017. 406 p. (in Russian).

## Информация об авторах

*Громько Петр Николаевич* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты», Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212000, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: grom\_7@tut.by

*Хатетовский Станислав Николаевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Металлорежущие станки и инструменты», Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212000, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: mechlab@yandex.ru

*Трусов Игорь Валерьевич* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Технология металлов», Белорусско-Российский университет (пр. Мира, 43, 212000, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: verstand@yandex.ru

## Information about the authors

*Petr N. Gromyko* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Chair “Metal-Cutting Machines and Tools”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: grom\_7@tut.by

*Stanislav N. Khatetovsky* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Chair “Metal-Cutting Machines and Tools”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: mechlab@yandex.ru

*Igor V. Trusov* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Chair “Process Metallurgy”, Belarusian-Russian University (43, Mira Ave., 212000, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: verstand@yandex.ru

Л. Л. Сотник<sup>1</sup>, С. И. Русан<sup>1</sup>, Л. А. Сиваченко<sup>2</sup>, О. И. Наливко<sup>1</sup><sup>1</sup>Барановичский государственный университет, Барановичи, Брестская область, Республика Беларусь<sup>2</sup>Белорусско-Российский университет, Могилев, Республика Беларусь**МЕТОД ПРИБЛИЖЕННОГО АНАЛИЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛА  
С ВАЛКАМИ В ВИБРОВАЛКОВОМ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЕ**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования процесса измельчения материала в валковых агрегатах с различными кинематическими особенностями. В качестве объекта исследования выбрана конструкция вибровалкового агрегата, имеющего большие перспективы использования в производстве. Характерной особенностью такого агрегата является значительное влияние на процесс измельчения сил инерции. В качестве основного метода исследования принят метод моделирования, причем применительно к движению рабочих органов валкового и вибровалкового измельчителя и измельчаемого материала. Представлен приближенный анализ взаимодействия измельчаемого материала в валковых агрегатах с валками. Измельчаемый материал моделируется совокупностью горизонтальных элементарных слоев. На первом этапе представлено измельчение материала в валках с постоянными кинематическими параметрами. Установлены аналитические зависимости давления валков на материал. На втором этапе рассмотрено измельчение материалов в вибровалковом измельчителе. Отличительной особенностью вибровалкового измельчителя является наличие эксцентрично установленного валка. Представлен вариант, когда эксцентрик выполняет криволинейно-поступательное движение, а валок совершает гармонические колебания (вибрации) вдоль осей координат с амплитудой  $e$ . Рассмотрены возникающие при этом силы инерции и колебательные движения валка. Проведен анализ суммарного усилия в рассматриваемом агрегате, позволяющем реализовать раздавливающе-сдвиговое и вибрационное воздействия на измельчаемый материал. Силовое взаимодействие валка с материалом описано двумя системами сил: силами упругости, возникающими в результате сокращения модельных слоев согласно закону Гука, и силами, вызванными вибрацией валка (силами инерции). Полученные результаты имеют практическую значимость при проектировании валковых агрегатов и вибрационной техники, а также для анализа работы подобных конструкций измельчителей.

**Ключевые слова:** деформации, усилие, сопротивление, вибровалковый измельчитель, эксцентриковый валок, вибрации

**Для цитирования:** Метод приближенного анализа взаимодействия материала с валками в вибровалковом измельчителе / Л. Л. Сотник [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 453–463. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-453-463>

Leonid L. Sotnik<sup>1</sup>, Sergey I. Rusan<sup>1</sup>, Leonid A. Sivachenko<sup>2</sup>, Oleg I. Nalivko<sup>1</sup><sup>1</sup>Baranovichi State University, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus<sup>2</sup>Belarussian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus**METHOD FOR APPROXIMATE ANALYSIS OF INTERACTION OF MATERIAL WITH ROLLS  
IN A VIBROROLL GRINDER**

**Abstract.** The article presents the results of a study of the process of material grinding in roller aggregates with various kinematic features. As the object of research, the design of a vibroroller unit is selected, which has great prospects for use in production. A characteristic feature of this unit is a significant influence on the grinding process of inertia forces. As the main method of research in relation to the movement of the working bodies of the roller and vibroroller shredder and the crushed material, a method of modeling is adopted. It is presented an approximate analysis of the interaction of the crushed material in roll units with rolls. The crushed material is modeled by a set of horizontal elementary layers. At the first stage, the material is crushed in rolls with constant kinematic parameters. Analytical dependencies of the roll pressure on the material are established. At the second stage, the grinding of materials in a vibroroller shredder is considered. A distinctive feature of the vibroroller shredder is the presence of an eccentrically installed roll. The variant is presented when the eccentric performs a curvilinear translational motion, and the roll performs harmonic fluctuation (vibrations) along the coordinate axes with an amplitude of  $e$ . The resulting inertia forces and oscillatory motions of the roll are considered. The analysis of the total force in the unit under consideration, which makes it possible to implement crushing-shear and vibration effects on the crushed material, is carried out. The force interaction of the roll with the material is described by two systems of forces: the elastic forces resulting from the contraction of the model layers according to Hooke's law, and the forces caused by the vibration of the roll (inertia forces). The results obtained are of practical importance in the design of roller units and vibration equipment, as well as for the analysis of the operation of such designs of grinders.

**Keywords:** deformation, force, resistance, vibratory shredder, eccentric roll, vibration

**For citation:** Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A., Nalivko O. I. Method for approximate analysis of interaction of material with rolls in a vibroroll grinder. *Vestsi Natsyunal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 453–463 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-453-463>

**Введение.** Измельчению подвергаются материалы, имеющие различные прочность, твердость и абразивность. Процесс разделения исходного куска материала на отдельные части происходит, когда внешние механические силы превышают внутренние силы молекулярного взаимодействия. Вместе с тем при измельчении образуются новые поверхности [1].

Согласно имеющимся в литературе данным [2–8], реальная прочность измельчаемых материалов на несколько порядков ниже теоретической прочности. Поверхностные слои материала являются потенциально возможными местами зарождения трещин.

Одной из важнейших характеристик, определяющих эффективность работы вибровалкового измельчителя, является сила воздействия валков на измельчаемый материал. Необходимая для измельчения сила влияет на энергозатраты процесса и зависит от многих параметров.

Для того чтобы разрушить тело, его необходимо деформировать на такую величину, при которой в материале возникнет разрушающее напряжение. В вибровалковом измельчителе в материале возникают раздавливающе-сдвиговые и вибрационные (ударные) деформации. Цель исследования заключается в создании математической модели, позволяющей описать механизм разрушения материалов в вибровалковом измельчителе и получить уравнение для расчета усилия измельчения.

**Методика проведения исследования.** Процессам точного проектирования таких агрегатов с определением их технологической эффективности, прочности, необходимой мощности двигателей предшествует приближенный анализ силового взаимодействия измельчаемого материала с валками. Приближенный расчет в дальнейшем может быть уточнен.

На рис. 1 схематично показан простой вариант валков, горизонтальные оси вращения которых  $O_1, O_2$  совмещены с их геометрическими осями симметрии. Материал, подлежащий переработке, находится в бункере (на рисунке не показан) над валками 1, 2. Валки вращаются в противоположные стороны с угловыми скоростями  $\omega_1, \omega_2$ . Измельчаемый материал под действием силы тяжести и силы сцепления с валками перемещается в пространство между валками, которое сужается к минимальной ширине  $b$ .

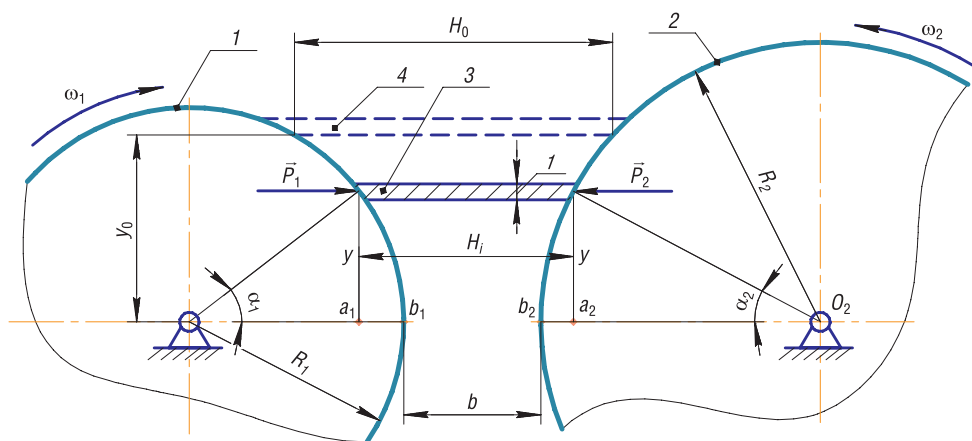


Рис. 1. Модель для анализа взаимодействия осесимметричных валков с материалом

Fig. 1. A model for analyzing the interaction of axisymmetric rolls with material

#### **Определение сил взаимодействия материала с валками в симметричных агрегатах.**

Для изучения сил взаимодействия выделим двумя горизонтальными плоскостями в пространстве между валками слой материала единичной толщины (см. рис. 1) на расстоянии  $y$  от осевой линии  $O_1O_2$ . Поперечный размер слоя обозначим  $H_i$ . Будем учитывать, что величина  $H_i$  является функцией координаты  $y$ :  $H_i = H_i(y)$ . Продольный размер слоя  $B'$  примерно равен длине валков. Разделим слой в продольном направлении на  $B$  частей.

Одну из них размера  $H_i \times 1 \times 1$  будем дальше условно рассматривать как сжатый упругий элементарный слой 3, деформации которого подчиняются закону Гука.

Введем ряд условий:

элементарный слой представляет собой пространство, заполненное измельчаемым материалом; содержащийся в слое материал нестабилен – может перемещаться вдоль и поперек своей оси; материал может работать только на сжатие.

На слой материала со стороны валков действуют силы, осевые составляющие которых обозначим через  $P_1, P_2$ . Из условия равновесия элементарного слоя  $\sum X_i = 0$  устанавливаем:  $P_1 = P_2 = P(y) = P$ . Будем считать, что сила тяжести содержащегося над слоем материала и сила его сцепления с валками не влияют на величину силы продольного сжатия  $P$ , а только продвигают слой материала вниз. Часть пространства между валками, в границах которого элементарный слой подвергается деформации и разрушению, будем называть активной зоной. На рис. 1 активная зона сверху ограничена слоем 4 длиной  $H_0$  (показан пунктиром), снизу – отрезком  $b$  осевой линии  $O_1O_2$ .

Найдем длину  $H_i$  элементарного слоя в его произвольном положении 3. Согласно рис. 1,

$$H_i = H_i(y) = a_1 a_2 = b_1 b_2 + a_1 b_1 + a_2 b_2 = b + R_1 + R_2 - \left( \sqrt{R_1^2 - y^2} + \sqrt{R_2^2 - y^2} \right).$$

Далее для упрощения везде будем полагать, что  $R_1 = R_2 = R$ . Тогда получим

$$H_i = b + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right). \tag{1}$$

Деформация слоя равна

$$\Delta H = H_0 - \left( b + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right) \right). \tag{2}$$

Согласно закону Гука  $\Delta H = p H_0 / c$ , откуда  $p = c \Delta H / H_0$ , и с учетом выражений (1), (2) определяем

$$p = \frac{c \left[ H_0 - b - 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right) \right]}{\left[ b + 2 \left( R - \sqrt{R^2 - y^2} \right) \right]}.$$

Представим полученный результат в следующем виде:

$$p = c \left\{ \left[ \frac{H_0}{\left( a - 2 \sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] - 1 \right\}, \tag{3}$$

где  $a = 2R + b = O_1O_2$ ; величины  $p$  и  $c$  измеряются в единицах силы, что приходится на единицу длины валка (Н/м).

По формуле (3) определяется интенсивность нагрузки (давления) на материал со стороны валка 2. Такое же по величине реактивное воздействие испытывает и валок. Приближенный график нагрузки представлен на рис. 2.

Допустим, что при  $y = 0$  интенсивность нагрузки  $p$  достигает разрушительно значения  $P_p$ . Тогда выражение (3) позволяет найти соответствующую величину жесткости  $c$ . В действительности, при  $y = 0$  по формуле  $P_p = c((H_0/b) - 1)$ , откуда  $c = P_p / ((H_0/b) - 1)$ .

Находим равнодействующую  $P$  распределенной нагрузки  $p$  в пределах активной зоны:

$$P = \int_0^{y_0} P p dy,$$

или

$$P = c B \int_0^{y_0} \left\{ \left[ \frac{H_0}{\left( a - 2 \sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] - 1 \right\} dy. \tag{4}$$

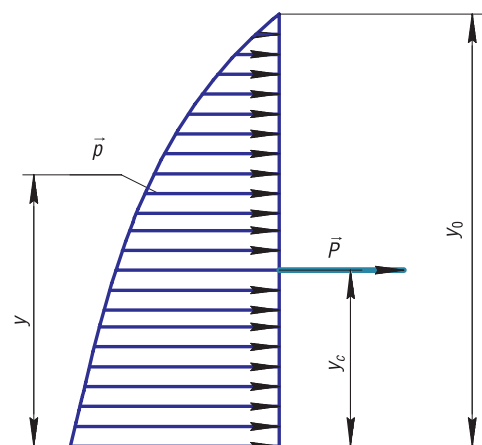


Рис. 2. Приближенный график давления на материал  
Fig. 2. An approximate graph of material pressure

Определим сначала интеграл от первой составляющей вычитания в выражении (4), что в квадратных скобках. Для этого используем подстановку  $y = R \sin t$ . Получаем

$$\int_0^{y_0} \left[ \frac{H_0}{\left( a - 2\sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] dy = H_0 \int_0^{y_0} \frac{d(R \sin t)}{a - 2\sqrt{R^2 - R^2 \sin^2 t}} = H_0 \int_0^{y_0} \frac{R \cos t dt}{a - 2R \cos t} =$$

$$= -\frac{H_0}{2} \int_0^{y_0} \frac{(-2R \cos t) dt}{a - 2R \cos t} = -\frac{H_0}{2} \int_0^{y_0} \frac{(a - 2R \cos t - a) dt}{a - 2R \cos t} = \frac{H_0}{2} \int_0^{y_0} \left( \frac{a}{a - 2R \cos t} - 1 \right) dt. \quad (5)$$

Найдем интеграл от первого составляющего выражения (5). Применив универсальную подстановку  $\operatorname{tg} t/2 = t$ , которой соответствуют зависимости

$$\sin t = \frac{2t}{1+t^2}, \quad \cos t = \frac{1-t^2}{1+t^2}, \quad dt = \frac{2dt}{1+t^2}, \quad (6)$$

получаем

$$\int \frac{adt}{a - 2R \cos t} = \int \frac{2adt / (1+t^2)}{a - 2R(1-t^2) / (1+t^2)} = 2a \int \frac{dt}{a(1+t^2) - 2R(1-t^2)} = 2a \int \frac{dt}{b + kt^2} = \frac{2a}{k} \int \frac{dt}{(b/k) + t^2} =$$

$$= \frac{2a}{k} \int \frac{dt}{\left( \sqrt{b/k} \right)^2 + t^2} = \frac{2a}{k \sqrt{b/k}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} t \right) = \frac{2a}{\sqrt{kb}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} t \right), \quad (7)$$

где  $k = 4R + b$ .

Находим интеграл от второго составляющего выражения (5):

$$\int dt = \int \frac{dt}{1+t^2} = 2 \operatorname{arctg} t. \quad (8)$$

Подставляя выражения (7) и (8) в выражение (5), получаем:

$$\int \left[ \frac{H_0}{\left( a - 2\sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] dy = \frac{aH_0}{\sqrt{kb}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} t \right) - H_0 \operatorname{arctg} t. \quad (9)$$

В правой части равенства (9) возвращаемся к переменной  $y$ . В выражениях (5) и (8) использовались формулы:  $\sin t = 2t/(1+t^2)$  и  $\sin t = y/R$ ; поэтому  $2t/(1+t^2) = y/R$ . Следовательно  $(y/R)t^2 - 2t + y/R = 0$ .

Корни полученного квадратного уравнения приводятся к виду

$$\tau_{1,2} = \left( R \pm \sqrt{R^2 - y^2} \right) / y. \quad (10)$$

Здесь оба корня  $\tau_1, \tau_2$  положительные. Примем тот из них, при котором сила по выражению (4) принимает большее значение. Будем считать, что таким корнем является корень  $\tau_1 = \left( R + \sqrt{R^2 - y^2} \right) / y$ .

Подставляя выражение (9) в выражение (4) и присоединяя второй интеграл, получаем:

$$\int dy = y.$$

$$P = cB \left\{ H_0 \left[ \frac{a}{\sqrt{kb}} \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau_1 \right) - \operatorname{arctg} \tau_1 \right] - y \right\} \Big|_0^{y_0}. \quad (11)$$

Подставляя в выражение (11) пределы интегрирования, будем учитывать, что при  $y = 0$ ,  $\tau_1 = 2R/0 = \infty$ ,  $\operatorname{arctg} \infty = \pi/2$ .



Тогда согласно выражению (11) находим

$$P = cB \left\{ H_0 \left[ a' \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau'_1 \right) - \operatorname{arctg} \tau'_1 - (a' - 1) \frac{\pi}{2} \right] - y_0 \right\}, \quad (12)$$

где  $a' = \frac{a}{\sqrt{kb}}$ ,  $\tau'_1 = \frac{(R + \sqrt{R^2 - y_0^2})}{y_0}$ .

Чтобы определить положение линии действия силы  $P$ , то есть координату  $y_c$  (см. рис. 2), необходимо сначала найти статический момент  $S$  нагрузки  $p$  относительно оси валка  $O_2$  по формуле

$$S = \int_0^{y_0} p y dy.$$

С учетом выражения (3) получаем

$$S = c \int_0^{y_0} \left\{ \left[ \frac{H_0 y}{(a - 2\sqrt{R^2 - y^2})} \right] - y \right\} dy. \quad (13)$$

Преобразуем первое составляющее под интегралом; при  $y = R \sin t dt$  находим:

$$\frac{y dy}{a - 2\sqrt{R^2 - y^2}} = \frac{(R \sin t)(R \cos t dt)}{a - 2R \cos t} = \frac{R^2 \cos t \sin t dt}{a - 2R \cos t}.$$

Введем новую подстановку  $\cos t = \tau$ , тогда  $\sin t dt = -d\tau$ .

Следовательно, первое составляющее выражения (13) приобретает вид

$$\frac{y dy}{a - 2\sqrt{R^2 - y^2}} = \frac{R^2 (-\tau) d\tau}{a - 2R\tau} = \frac{R^2 (a - 2R\tau - a) d\tau}{2R(a - 2R\tau)} = \frac{R}{2} \left( 1 - \frac{a}{a - 2R\tau} \right) d\tau.$$

Выполняем интегрирование полученного выражения. Поскольку здесь

$$\int d\tau = \tau, \quad \int \frac{a d\tau}{a - 2R\tau} = -\frac{a}{2R} \ln(a - 2R\tau),$$

то

$$\int \frac{y dy}{a - 2\sqrt{R^2 - y^2}} = \frac{R \left\{ \tau + \left[ a \ln(a - 2R\tau) \right] / 2R \right\}}{2}. \quad (14)$$

Возвращаемся к правой части равенства (14): сначала к переменной  $t$ , затем – к  $y$ ; при этом учитываем, что  $\sin t = y/R$ :

$$\cos t = \sqrt{1 - (y/R)^2} = \sqrt{R^2 - y^2} / R.$$

Получаем

$$\int \frac{y dy}{a - 2\sqrt{R^2 - y^2}} = \left\{ \sqrt{R^2 - y^2} + a \left[ \ln(a - 2\sqrt{R^2 - y^2}) \right] / 2 \right\} / 2. \quad (15)$$

Подставляем полученное выражение (15) в выражение (13) и присоединяем интеграл  $\int y dy$  второго составляющего (13):

$$S = c \left\{ H_0 \left\{ \sqrt{R^2 - y^2} + a \left[ \ln(a - 2\sqrt{R^2 - y^2}) \right] / 2 \right\} / 2 - y^2 / 2 \right\} \Big|_0^{y_0}.$$

Подставляем пределы  $(0, y_0)$ :

$$S = c \left\{ H_0 \frac{\left\{ x_0 + a \left[ \ln(a - 2x_0) \right] / 2 \right\}}{2} - \frac{y_0^2}{2} - c \frac{\left\{ H_0 \left[ R + a(\ln b) / 2 \right] \right\}}{2} \right\}. \quad (16)$$

Координату  $y_c$  определяем по формуле

$$y_c = S / P. \quad (17)$$

Процесс измельчения материала в рассмотренном агрегате с неизменным межвалковым пространством будем называть стабильным. Разделение фракции происходит без существенных динамических воздействий. Это позволяет для приближенного силового анализа конструкции агрегата использовать уравнения статики.

На рис. 3 представлена система сил, возникающих при взаимодействии валков с измельчаемым материалом. Введем следующие обозначения:  $G_T$  – сила тяжести материала, находящегося в бункере 3 и активном пространстве между валками;  $F_i$  – сила инерции части материала (его масса определяется опытным путем), перемещаемого с ускорением через межвалковое пространство;  $G = G_T - F_i$ ;  $G' = G/2\sin\alpha$  – перпендикулярная к поверхности валка составляющая силы  $G$ , ограничивающей активное пространство;  $G_1, G_2$  – силы тяжести валков;  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$  – реакции опор, в которых закреплены оси валков;  $M_1, M_2$  – моменты на валках.

Силой  $F_i$  можно пренебречь.

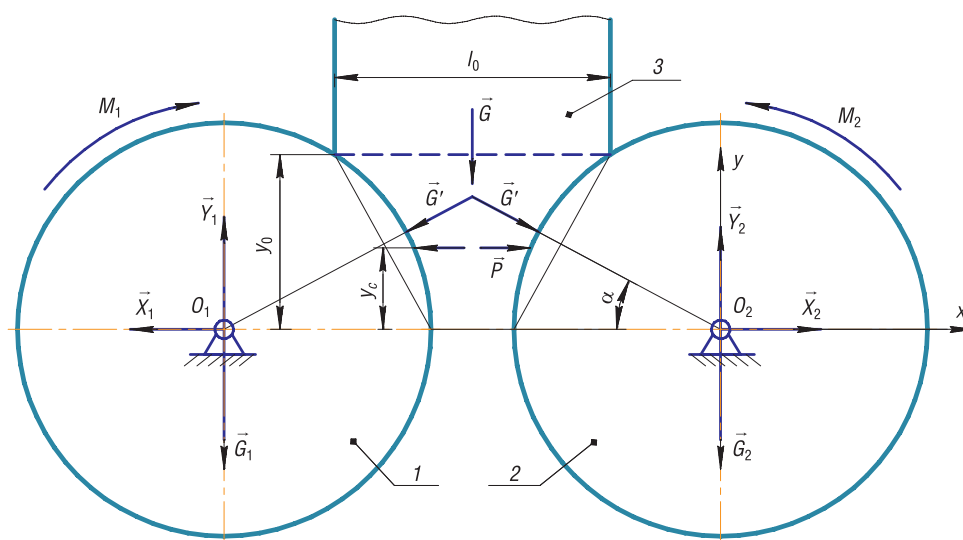


Рис. 3. Схема системы сил  
Fig. 3. Force system diagram

Условия равновесия валка 2 представим следующим образом:

$$P + G' \cos \alpha + X_2 = 0; \quad Y_2 - G' \sin \alpha - G_2 = 0; \quad M_2 - P y_c = 0. \quad (18)$$

Из уравнений (18) находятся неизвестные  $X_2, Y_2$ , и  $M_2$ , необходимые для проектирования опор валков и выбора параметров двигателей.

**Определение сил взаимодействия в вибровалковом измельчителе.** Рассмотрим конструкцию, в которой правый валок 2 выполняет сложное движение (патент РФ № 186478 : В02С 4/32 «Вибровалковый измельчитель-активатор», авторы: В. С. Севостьянов, Л. А. Сиваченко, М. В. Севостьянов, Т. Л. Сиваченко, Л. Л. Сотник, П. Ю. Горягин; [9–11] ). Его ось симметрии  $CC$  шарнирно закреплена на перекладке эксцентрикового вала, представляющего собой прямоугольную рамку, которая вращается вокруг неподвижной оси  $O_2O_2$  (рис. 4).

Величину сдвига оси валка (его эксцентриситет) обозначаем  $e$ , на рис. 4 этот размер многократно увеличен. Свободно закрепленный на перекладке  $CC$  валок имеет две степени свободы. Поэтому его абсолютный угол поворота  $\varphi_2$  определяется суммой двух углов:  $\varphi_2 = \varphi_{2e} + \varphi_{2r}$ , где  $\varphi_{2e}$  – угол поворота валка вместе с эксцентриковым валом в переносном движении вокруг оси  $O_2O_2$ ;  $\varphi_{2r}$  – его поворот в относительном движении вокруг подвижной оси  $CC$ . Соответствующие угловые скорости эксцентрика обозначим  $\omega_{2e}, \omega_{2r}$ . При отсутствии дополнительного привода к валку 2 величина  $\omega_{2r}$  неопределенная.

Остановимся далее на варианте, при котором  $\omega_{2r} = -\omega_{2e}$ ; эксцентрик в этом случае выполняет криволинейно-поступательное движение. Каждая его точка описывает окружность радиусом  $e$ . Весь валок совершает гармонические колебания (вибрации) вдоль осей координат с амплитудой  $e$ . Измельчаемый материал будем, как и прежде, моделировать совокупностью горизонтальных элементарных слоев. Поэтому далее нас будут интересовать только горизонтальные вибрации эксцентрика, способные сжимать слои. Если исходное положение эксцентрика во введенной системе координат принять согласно рис. 5, то его уравнение движения вдоль оси  $O_2x$  определяется по формуле

$$x = e \sin \varphi_e, \tag{19}$$

где  $\varphi_e = \omega t$ ,  $\omega = \omega_{2e}$ .

Упрощенная модель поступательных колебаний (19) эксцентрика показана на рис. 6.

В процессе колебаний валок из положения 2 перемещается на расстояние  $e$  в крайнее левое положение 2', затем – в крайнее правое 2''. Перемещение эксцентрика из положения 2'' в 2', в ходе которого материал сжимается и разрушается, представляет собой его рабочий ход. Обратное перемещение валка из положения 2' в 2'' назовем холостым ходом. Заметим, что во время холостого хода силовое напряжение слоев уменьшается. В верхней части активного пространства оно может изменяться до нулевого значения с потерей контакта между валком и материалом. Восстанавливаться контакт будет при рабочем ходе с эффектом удара, который требует дополнительного исследования.

Силовое взаимодействие валка с материалом будем описывать двумя системами сил: силами упругости, возникающими в результате сокращения модельных слоев согласно закону Гука, и силами, вызванными вибрацией валка (силами инерции). Причины сокращений слоев две: продвижение материала в активном пространстве между валками и перемещение эксцентрикового валка влево из положения 2 в 2' (см. рис. 6), на расстояние  $e$ . Силовые взаимодействия для первого варианта описаны выражениями (12), (16) и (17). При этом в вибровалковом измельчителе с эксцентриковым правым валком активное пространство ограничивается справа поверхностью валка в положении 2 (см. рис. 6).

При вычислении сил упругости, соответствующих деформации  $\Delta H = e$ , приближенно считаем процесс нагружения слоя статическим. Тогда в соответствии с законом Гука для каждого слоя длиной  $H_i$  получим:  $p'H_i/c = e$ , где  $p'$  – элементарная сила взаимодействия валка с материалом. Равнодействующую силу  $P'$ , приложенную к материалу, определим по формуле

$$P' = ceB \int_0^{y_0} dy / H_i.$$

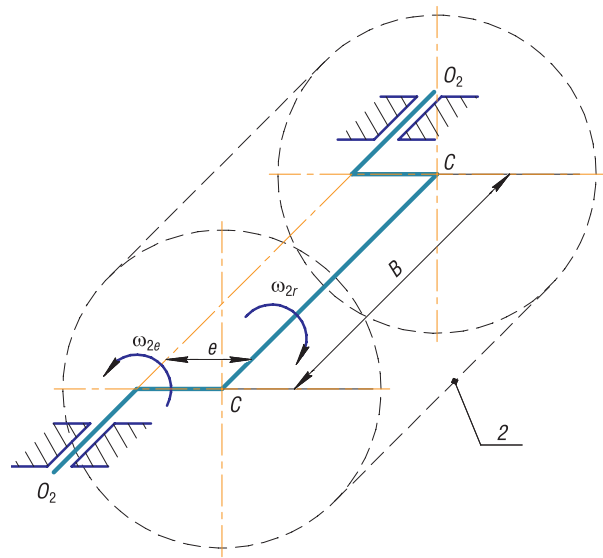


Рис. 4. Схема эксцентрикового валка  
Fig. 4. Eccentric roll scheme

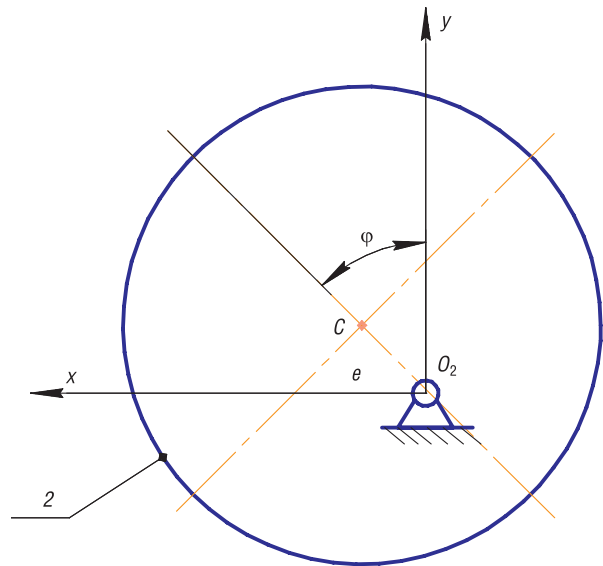


Рис. 5. Исходное положение эксцентрикового валка  
Fig. 5. Starting position of the eccentric roll

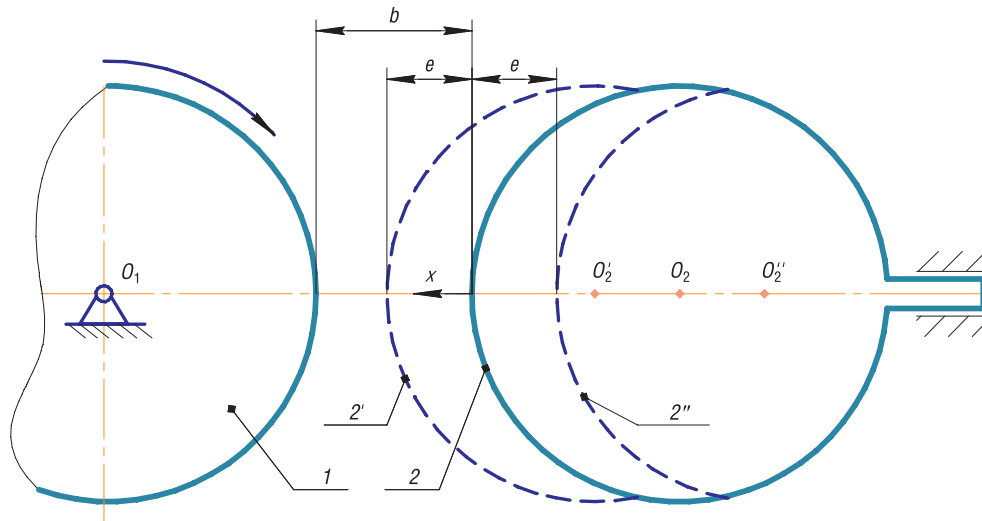


Рис. 6. Упрощенная модель колебаний эксцентрика  
Fig. 6. Simplified eccentric oscillation model

В данном случае ширина активного пространства  $H_i$  определяется выражением (1). Интегрирование выполняется, как и при определении первого интеграла в выражении (4). В результате получаем

$$P' = ceB \left[ a' \operatorname{arctg} \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \right) \tau'_1 - \operatorname{arctg} \tau'_1 - (a' - 1) \frac{\pi}{2} \right]. \quad (20)$$

Здесь сохранены все обозначения, принятые в выражении (12). Реакцию материала, также равную  $P'$ , можно представить с помощью рис. 2. По аналогии с выводом выражения (16) находим статический момент нагрузки  $p'$  относительно центра  $O_2$ . Окончательно получим

$$S' = ceB \left\{ \frac{\left\{ x_0 + a \left[ \ln(a - 2x_0) \right] / 2 \right\}}{2} - \frac{\left[ R + a(\ln b) / 2 \right]}{2} \right\}. \quad (21)$$

Положение линии действия реакции  $P'$  находим по формуле, аналогичной (17).

**Определение сил инерции.** Согласно [12, 13], силы инерции возникают во время движения материальных объектов с ускорением. В нашей задаче материальным объектом является измельчаемый материал, моделируемый совокупностью элементарных слоев. Длину слоя в его произвольном положении на рис. 7 обозначим  $H_i$ .

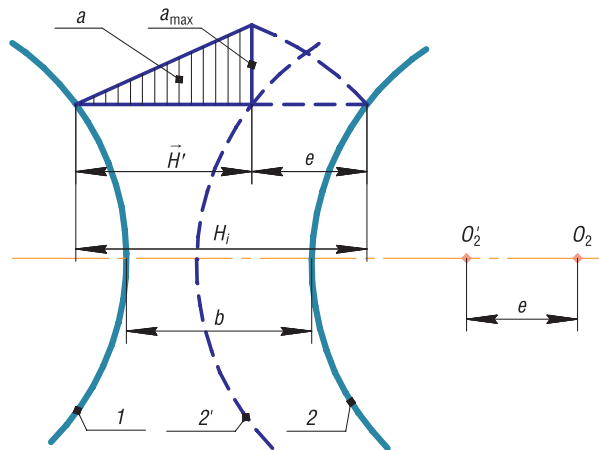


Рис. 7. График ускорения материала в положении 2'  
Fig. 7. Graph of material acceleration in position 2'

Считаем, что массы слоев  $m_H$  не зависят от их уровня в активном пространстве, задаваемом координатой  $y$ , и находятся, как для недеформированного слоя в его верхнем положении  $y = y_0$ :  $m_H = m_0 = \gamma_0 H_0$ , где  $\gamma_0$  – насыпная плотность материала. Допускаем, что при горизонтальном силовом воздействии эксцентриком масса слоя перемещается поступательно, как и сам валок. В таком случае его массу можно моделировать одним или несколькими материальными точками, а их силы инерции высчитывать по формуле вида  $f_i = ma$ , где  $m$  – масса материальной точки;  $a$  – ее ускорение. Определим по выражению (19)

максимальную силу инерции, которая имеет место при максимальном ускорении материала и эксцентрика,

$$a = \ddot{x} = -e\omega^2 \sin \omega t,$$

где при  $\omega t = \pi/2$  получаем

$$|a| = |a_{\max}| = e\omega^2.$$

Следовательно, максимальное ускорение  $a_{\max}$  возникает для эксцентрика в положении 2'. Массу слоя для этого положения будем представлять двумя материальными точками с массами  $m_e = (m_H/H_i)e$  и  $m_{H'} = (m_H/H_i)H'$ , где  $m_e$  и  $m_{H'}$  – массы участков слоя материала длиной  $e$  и  $H'$  соответственно; при этом  $e + H' = H_i$ .

Первая материальная точка соприкасается с валком и в его положении 2' достигает значения  $a_{\max}$ . Массу участка  $H'$  считаем равномерно распределенной по его длине, тогда его центр масс находится посередине отрезка  $H'$ . Также допускаем, что ускорение материала в пределах этого отрезка угасает по линейному закону от  $a_{\max}$  к 0 (см. рис. 7). Тогда центру масс участка  $H'$  – второй материальной точке – будет соответствовать ускорение  $a_{\max}/2$ .

Таким образом, расчетная (максимальная) сила инерции, действующая на элементарный слой, определяется выражением

$$f_i = m_e a_{\max} + m_{H'} a_{\max} / 2.$$

Подставив сюда значения слагаемых, получаем

$$f_i = m_H (e + H' / 2) a_{\max} / H_i = m_H [e + (H_i - e) / 2] a_{\max} / H_i = m_H (1 - e / H_i) a_{\max} / 2,$$

или сокращенно  $f_i = (1 + e / H_i) f_{ci}$ , где  $f_{ci} = m_H a_{\max} / 2 = \text{const}$ .

Равнодействующую  $F_i$  элементарных сил инерции для всего активного пространства определим по формуле

$$F_i = \int_0^{y_0} B f_i dy,$$

или

$$F_i = f_{ci} B \int_0^{y_0} \left[ 1 + \frac{e}{\left( a - 2\sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] dy. \quad (22)$$

Для определения статического момента сил инерции, приведенных к одной плоскости относительно центра  $O_2$ , используется выражение

$$S_i = f_{ci} B \int_0^{y_0} \left[ y + \frac{ey}{\left( a - 2\sqrt{R^2 - y^2} \right)} \right] dy. \quad (23)$$

Повторив в выражениях (22), (23) методику интегрирования, используемую ранее для выражений (4), (13), получим

$$F_i = f_{ci} B \left\{ e \left[ a' \arctg \left( \sqrt{\frac{k}{b}} \tau'_1 \right) - \arctg \tau'_1 - (a' - 1) \frac{\pi}{2} \right] + y_0 \right\}, \quad (24)$$

$$S_i = f_{ci} B \left\{ \frac{e}{2} \left\{ x_0 + \frac{a}{2} [\ln(a - 2x_0)] \right\} + \frac{y_0^2}{2} \right\} - f_{ci} B \left\{ \frac{e}{2} \left[ R + \frac{a}{2} (\ln b) \right] \right\}. \quad (25)$$

В выражениях (24), (25) сохранены обозначения, введенные ранее в выражениях (12), (16). Положение линии действия силы  $F_i$  находим, как и выше, по формуле  $y_c = S_i/F_i$ .

Как видим, расчетные значения трех силовых факторов имеют место в одной фазе движения эксцентрика, поэтому их воздействия на материал и эксцентрик суммируются. При этом расчетная схема вибровалкового измельчителя (см. рис. 3) дополняется силами  $P'$  и  $F_i$ .

Здесь представлено силовое взаимодействие в механической системе для случая, когда  $\omega_{2r} = -\omega_{2e}$ ; другое соотношение между угловыми скоростями в приближенной теории на результат не влияет.

**Заключение.** Разработан метод приближенного анализа взаимодействия материала с валками в вибровалковом измельчителе, основанный на использовании нелинейной зависимости между силами и деформациями.

Полученная в работе математическая модель позволяет описать механизм разрушения материалов в вибровалковом измельчителе. Аналитические зависимости для расчета усилия измельчения могут использоваться с различной эффективностью в зависимости от механических и структурных характеристик измельчаемого материала, а также от геометрических  $e$ ,  $b$ ,  $R$ , кинематических параметров  $\omega$  и других факторов.

Полученные выражения для расчета усилия измельчения с созданием раздавливающе-сдвиговых и вибрационных (ударных) деформаций могут использоваться при практической реализации представленного метода измельчения материалов.

### Список использованных источников

1. Дешко, Ю.И. Измельчение материалов в цементной промышленности / Ю.И. Дешко, М.Б. Креймер, Г.С. Крыхтин. – М.: Стройиздат, 1966. – 270 с.
2. Griffiths, A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids / A. A. Griffiths // *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*. – 1921. – Vol. 221. – P. 163–198.
3. Моргулис, М.Л. Вибрационное измельчение материалов / М.Л. Моргулис. – М.: Промстройиздат, 1957. – 105 с.
4. Ходаков, Г.С. Тонкое измельчение строительных материалов / Г.С. Ходаков. – М.: Стройиздат, 1972. – 238 с.
5. Справочник по обогащению руд / Ю.Э. Аккерман [и др.]. – М.: Недра, 1982. – 387 с.
6. Колмогоров, В.П. Напряжения, деформации, разрушение / В.П. Колмогоров. – М.: Metallurgia, 1970. – 229 с.
7. Зайцев, Ю.В. Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной / Ю.В. Зайцев, С.Н. Леонович. – Минск: БНТУ, 2010. – 362 с.
8. Эберхардштайнер, Й. Прочность и трещиностойкость конструкционных строительных материалов при сложном напряженном состоянии / Й. Эберхардштайнер, С.Н. Леонович, Ю.В. Зайцев. – Минск: БНТУ, 2013. – 522 с.
9. Сотник, Л.Л. Изучение влияния технологических факторов на потребляемую мощность вибровалкового измельчителя / Л.Л. Сотник, Л.А. Сиваченко, И.А. Богданович // *Вестн. Брест. гос. техн. ун-та. Машиностроение*. – 2018. – №4. – С. 19–22.
10. Сотник, Л.Л. Исследования взаимодействия материальной точки с цилиндрическим эксцентриком / Л.Л. Сотник, С.И. Русан, Л.А. Сиваченко // *Вестн. Белорус.-Рос. ун-та*. – 2019. – №1. – С. 48–54.
11. Сиваченко, Л.А. Кинематический анализ движения эксцентрикового валка вибровалкового измельчителя [Электронный ресурс] / Л.А. Сиваченко, Л.Л. Сотник, С.И. Русан // *Энерго-ресурсосберегающие технологии и оборудование в дорожной и строительной отраслях: Междунар. науч.-практ. конф., Белгород, 22–23 сент. 2017 г.* / Белгород. ГТУ им. В.Г. Шухова. – Белгород, 2017. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).
12. Чигарев, А.В. Курс теоретической механики: учеб. пособие / А.В. Чигарев, Ю.В. Чигарев. – Минск: Новое знание; М.: ЦУПД, 2010. – 397 с.
13. Хвясцько, Г.М. Курс тэарэтычнай механікі. – Мінск: БДТУ, 2000. – 354 с.

### References

1. Deshko Yu. I., Kreimer M. B., Krykhtin G. S. *Grinding Materials in the Cement Industry*. Moscow, Stroizdat Publ., 1966. 270 p. (in Russian).
2. Griffiths A. A. The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 1921, vol. 221, pp. 163–198.
3. Morgulis M. L. *Vibration Grinding of Materials*. Moscow, Promstroizdat Publ., 1957. 105 p. (in Russian).
4. Khodakov G. S. *Fine Grinding of Building Materials*. Moscow, Stroizdat Publ., 1972. 238 p. (in Russian).
5. Akkerman Yu. E., Bukaty G. B., Kizeval'ter B. V., Kornienko Ya. P., Olevskii V. A., Perov V. A., Povarov A. I., Yashin V. P. *Ore Beneficiation Handbook*. Moscow, Nedra Publ., 1982. 387 p. (in Russian).
6. Kolmogorov V. P. *Stresses, Deformations, Fracture*. Moscow, Metallurgia Publ., 1970. 229 p. (in Russian).
7. Zaitsev Yu. V. *Strength and Durability of Structural Materials with a Crack*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2010. 362 p. (in Russian).
8. Eberhardsteiner, J., Leonovich S. N., Zaitsev Yu. V. *Strength and Crack Resistance of Structural Building Materials under Complex Stress State*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2013. 522 p. (in Russian).
9. Sotnik L. L., Sivachenko L. A., Bogdanovich I. A. Studying the influence of technological factors on the power consumption of a vibratory shredder. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Mashinostroenie = Bulletin of the Brest State Technical University. Mechanical Engineering*, 2018, no. 4, pp. 19–22 (in Russian).

10. Sotnik L. L., Rusan S. I., Sivachenko L. A. Studies of the interaction of a material point with a cylindrical eccentric. *Vestnik Belorussko-Rossiiskogo universiteta* [Bulletin of the Belarusian-Russian University], 2019, no. 1, pp. 48–54 (in Russian).

11. Sivachenko L. A., Sotnik L. L., Rusan S. I. Kinematic analysis of the movement of an eccentric roll of a vibratory roll mill. *Energo-resursosberegayushchiye tekhnologii i oborudovaniye v dorozhnoy i stroitel'noy otraslyakh: Mezhdunarodnaya nauchnaya prakticheskaya konferentsiya, Belgorod, 22–23 sentyabrya 2017 g.* [Energy and Resource-Saving Technologies and Equipment in the Road and Construction Industries: International Scientific and Practical Conference, Belgorod, September 22–23, 2017]. Belgorod, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, 2017. CD-ROM (in Russian).

12. Chigarev A. V., Chigarev Yu. V. *Theoretical Mechanics Course*. Minsk, Novoe znanie Publ.; Moscow, Center for Educational and Professional Literature, 2010. 397 p. (in Russian).

13. Khvvyako G. M. *Theoretical Mechanics Course*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2000. 354 p. (in Belarusian).

### Информация об авторах

*Сотник Леонид Леонидович* – старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроения, руководитель секции технологии машиностроения, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская обл., Республика Беларусь). E-mail: Sotnikleonidtm@gmail.com

*Русан Сергей Иванович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технического обеспечения сельскохозяйственного производства и агрономии, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская обл., Республика Беларусь). E-mail: rusan33@mail.ru

*Сиваченко Леонид Александрович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры транспортных и технологических машин, Белорусско-Российский университет (ул. Грушевская, 32, 212003, Могилев, Республика Беларусь). E-mail: 228011@mail.ru

*Наливко Олег Игоревич* – аспирант, Барановичский государственный университет (ул. Войкова, 21, 225404, Барановичи, Брестская обл., Республика Беларусь). E-mail: alehnaliuko@mail.ru

### Information about the authors

*Leonid L. Sotnik* – Senior Lecturer, Department of Engineering Technology and Equipment, Head of the Engineering Technology Section, Baranovichi State University (21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus). E-mail: Sotnikleonidtm@gmail.com

*Sergey I. Rusan* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technical Support of Agricultural Production and Agronomy, Baranovichy State University (21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus). E-mail: ru-san33@mail.ru

*Leonid A. Sivachenko* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Transport and Technological Machines, Belarusian-Russian University (32, Grushevskaya Str., 212003, Mogilev, Republic of Belarus). E-mail: 228011@mail.ru

*Oleg I. Nalivko* – Postgraduate Student, Baranovichy State University (21, Voikov Str., 225404, Baranovichi, Brest Region, Republic of Belarus). E-mail: alehnaliuko@mail.ru

**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**  
**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

УДК 675.026.267:66.047.1  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>

Поступила в редакцию 18.03.2020  
Received 18.03.2020

**А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев**

*Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь*

**КИНЕТИКА ТЕПЛОВЛАГООБМЕНА И МЕТОД РАСЧЕТА ДЛИТЕЛЬНОСТИ  
КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ НАТУРАЛЬНОЙ КОЖИ**

**Аннотация.** Рассмотрены способы обработки экспериментальных данных, основанные на обобщенных переменных процесса сушки, характеризующие наиболее общие закономерности сушки в периоде падающей скорости. Представлен метод обработки опытных данных на основе развернутого уровня кинетики сушки, который позволяет получить все зависимости для расчета основных параметров процесса сушки. Приведены уравнения для определения плотностей тепловых потоков, интенсивности испарения влаги, температуры материала и длительности сушки для периода падающей скорости. Дана зависимость для вычисления числа Ребиндера, устанавливающая связь влагообмена с теплообменом для второго периода сушки. Установлены значения всех коэффициентов в уравнении для теплообменного критерия Нуссельта, необходимые для определения коэффициента теплообмена. Представлены расчеты коэффициента теплообмена для целого ряда режимов сушки натуральных кож. На основе разработанного Б. С. Сажиним метода расчета кинетики сушки установлено уравнение для определения длительности сушки кож, описывающее весь процесс сушки, включая оба периода сушки. Такой метод расчета кинетики сушки содержит минимальное количество коэффициентов, определяемых опытным путем, что сокращает объем работы при обработке данных опытов и количество необходимых экспериментов. Определены основные постоянные в критериальном уравнении теплообмена для определения коэффициента теплообмена. Дана проверка достоверности всех полученных уравнений и сопоставление расчетных и экспериментальных значений по всем параметрам кинетики сушки. Полученные результаты исследования сушки натуральных кож позволяют контролировать технологический процесс, не допуская пересушивания кож, нарушения температурного режима, что приводит к сокращению энергетических затрат на сушку.

**Ключевые слова:** натуральная кожа, конвективная сушка, влагосодержание, температура мокрого термометра, число Ребиндера, критерий Био, длительность сушки, интенсивность испарения

**Для цитирования:** Ольшанский, А. И. Кинетика теплообмена и метод расчета длительности конвективной сушки натуральной кожи / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 464–475. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>

**Anatoly I. Alshansky, Andrej L. Klimentyev**

*Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Belarus*

**KINETICS OF HEAT AND MOISTURE EXCHANGE AND METHOD FOR CALCULATING THE DURATION  
OF THE CONVECTIVE DRYING PROCESS OF NATURAL LEATHER**

**Abstract.** Methods for processing experimental data based on generalized variables of the drying process, which characterize the most general patterns of drying in a period of decreasing speed, are considered. A method for processing experimental data based on the expanded level of drying kinetics is presented, which allows obtaining all dependencies for calculating the main parameters of the drying process. Equations are given for determining the densities of heat fluxes, the intensity of moisture evaporation, the temperature of the material, and the duration of drying for the period of falling speed. A dependence is given for calculating the Rebinder number, which establishes a relationship between moisture exchange and heat exchange for the second drying period. The values of all the coefficients in the equation for the Nusselt heat transfer criterion,



which are necessary for determining the heat transfer coefficients, have been established. Calculations of the heat transfer coefficient for a number of modes of natural leather drying are presented. On the basis of the method for calculating the drying kinetics developed by B. S. Sazhin, an equation was established to determine the drying time of leather, which describes the entire drying process, including both drying periods. This method of calculating the kinetics of drying contains a minimum number of coefficients determined empirically, which reduces the amount of work at processing these experiments and the number of necessary experiments. The main constants in the criterial heat transfer equation for determining the heat transfer coefficient have been determined. Verification of the reliability of all obtained equations and comparison of the calculated and experimental values for all parameters of the drying kinetics are given. The obtained results of the study of drying natural leathers make it possible to control the technological process, preventing overdrying of the leather, disturbing the temperature regime, which leads to a reduction in energy costs for drying.

**Keywords:** natural leather, convective drying, moisture content, wet thermometer temperature, Rebinder number, Bio criterion, drying time, evaporation rate

**For citation:** Ol'shanskii A. I., Klimentyev A. L. Kinetics of heat and moisture exchange and method for calculating the duration of the convective drying process of natural leather. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 464–475 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>

**Введение.** Натуральная кожа относится к термочувствительным материалам, и сушка проводится при мягких режимах нагретым воздухом с температурой  $t_c = 30 \div 60$  °С при скорости  $v = 0,5 \div 2,0$  м/с с высоким влагосодержанием теплоносителя  $\varphi = 40 \div 80$  %, для избежания значительной усадки и коробления материала при сушке [1–4]. Именно усадка и коробление являются основным препятствием для быстрой интенсивной сушки при повышенных температурах [1–4]. Поэтому выбор рационального режима сушки при минимальной длительности процесса с высоким качеством готового продукта имеет большое значение и требует проведения экспериментальных исследований.

**Кинетика конвективной сушки тонких материалов.** Изменение во времени  $\tau$  среднего по объему влагосодержания  $\bar{u}$  и средней температуры  $\bar{t}$  влажного тела принято называть кривой сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурной кривой  $\bar{t} = f(\tau)$  [2, 5, 6].

На рис. 1 изображены типичные для сушки тонких плоских материалов кривая сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурная кривая  $\bar{t} = f(\tau)$  в процессе сушки краснотубной юфти при следующем режиме:  $t_c = 50$  °С;  $v = 1$  м/с и  $\varphi = 45$  %. В начальный момент времени температура тела одинакова и равна начальной  $t_n$ . Влагосодержание материала непрерывно уменьшается и стремится к равновесному  $u_p$ , а температура тела достигает температуры среды  $t_c$  при  $\tau \rightarrow \infty$ . Из рис. 1 видно, что кривая сушки стремится к горизонтальной асимптоте  $\bar{u}(\tau) = u_p$ .

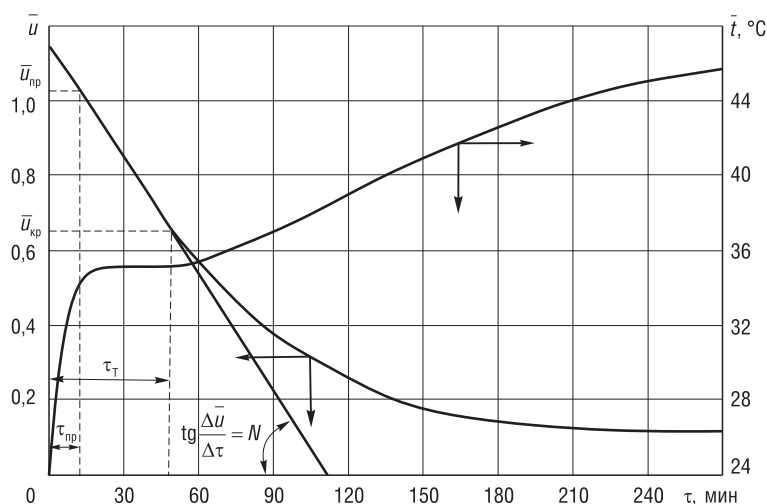


Рис. 1. Кривая сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурная кривая  $\bar{t} = f(\tau)$  в процессе конвективной сушки краснотубной юфти в режиме сушки:  $t_c = 50$  °С,  $v = 1$  м/с и  $\varphi = 45$  %

Fig. 1. The drying curve  $\bar{u} = f(\tau)$  and the temperature curve  $\bar{t} = f(\tau)$  in the process of convective drying of red-bodied yuft (russian leather) in the drying mode:  $t_c = 50$  °С,  $v = 1$  m/s and  $\varphi = 45$  %

Всю кривую кинетики сушки условно разделяют на три участка, соответствующие различным периодам сушки: стадию прогрева, постоянной скорости сушки (первый период), падающей скорости сушки (второй период). В стадии прогрева подводимое к телу тепло расходуется на прогрев материала от начальной температуры  $t_n$  до температуры мокрого термометра  $t_{м.т}$  и на испарение влаги. Для тонких материалов период прогрева очень мал по сравнению с другими периодами сушки. Скорость сушки в стадии прогрева возрастает от нуля до скорости сушки в первом периоде  $N$ .

В стадии прогрева удельный поток тепла  $q_{пр}$  идет на нагрев влажного тела и на испарение влаги с поверхности материала

$$q_{пр} = c_{вл} \cdot \rho \cdot R_V \frac{t_c - t_n}{\tau_{пр}} + r \cdot j_{пр},$$

где  $c_{вл}$  – удельная теплоемкость влажного тела;  $\rho$  – плотность сухого тела;  $R_V$  – характерный размер тела,  $R_V = V/F$  (отношение объема тела к поверхности испарения материала);  $\tau_{пр}$  – время прогрева тела;  $t_n$  – начальная температура материала;  $t_c$  – температура теплоносителя;  $r$  – теплота парообразования;  $j_{пр}$  – интенсивность испарения влаги в стадии прогрева,  $j_{пр} = \bar{\alpha}(t_c - t_n)/r$ , где  $\bar{\alpha}$  – коэффициент теплоотдачи.

В стадии прогрева поток тепла  $q_{пр} > q_{исп}$ . Когда влажное тело прогревается, температура его растет, разность температур  $(t_c - \bar{t})$  уменьшается, и поток тепла расходуется только на испарение влаги из материала ( $q = q_{исп}$ ), наступает период постоянной скорости сушки. Температура материала становится равной температуре мокрого термометра  $t_{м.т}$ . Поскольку температура в периоде постоянна, то  $d\bar{t}/d\tau = 0$  и число Рейбиндера  $Rb = 0$  [6–8].

Первый период протекает до критического влагосодержания  $\bar{u}_{кр}$ . При уменьшении  $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$  наступает период падающей скорости сушки (второй период) с непрерывным увеличением температуры материала. Второй период при уменьшении влагосодержания  $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$  протекает в регулярном тепловом режиме.

В периоде падающей скорости сушки при  $\bar{u} < \bar{u}_{кр}$  уже наступает регулярный тепловой режим, и регуляризация происходит по температурам, влагосодержаниям и тепловым потокам [2, 9–11].

Кинетика сушки в стадии прогрева материала приближенно аппроксимируется уравнением [5, 6]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \frac{\bar{t} - t_n}{t_{м.т} - t_n} N, \quad (1)$$

где  $d\bar{u}/d\tau$  – скорость сушки;  $\bar{t}$  – средняя температура в стадии прогрева;  $N$  – скорость сушки в первом периоде,  $N = \frac{\bar{\alpha}(t_c - t_n)}{r \cdot \rho \cdot R_V}$ .

В случае сушки тонких тел при мягких режимах, когда можно пренебречь градиентом температуры по сечению и приближенно, допуская равенство средней температуры тела  $\bar{t} = t_{пр}$ , уравнение баланса тепла имеет вид [6]

$$c_{вл} \cdot G_0 \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} F (t_c - t_{пр}), \quad (2)$$

где  $c_{вл}$  – удельная теплоемкость влажного материала,  $G_0$  – сухая масса тела,  $d\bar{t}/d\tau$  – скорость изменения температуры.

В свою очередь теплоемкость влажного материала [2] можно представить следующим образом:

$$c_{вл} = c_0 + c_{ж} \cdot \bar{u},$$

где  $c_0$  – удельная теплоемкость сухого материала,  $c_{ж}$  – теплоемкость жидкости.

Разделяя переменные и интегрируя уравнение (2), получим время прогрева материала [6]:

$$\tau_{пр} \approx \frac{c_{вл} \cdot G_0}{\bar{\alpha} \cdot F} \ln \left( \frac{t_c - t_n}{t_c - t_{м.т}} \right), \quad \tau_{пр} = \frac{c_{вл}}{\bar{\alpha}} \cdot \rho \cdot R_V \cdot \ln \left( \frac{t_c - t_n}{t_c - t_{м.т}} \right). \quad (3)$$

Основное уравнение кинетики сушки запишем в виде [2]

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} \cdot \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = N^* (1 + Rb), \quad (4)$$

где  $q^*$  – относительная плотность теплового потока;  $q_I, q_{II}$  – плотность потока тепла в первом и втором периодах сушки;  $\bar{\alpha}_{кр}$  – коэффициент теплообмена в первом периоде сушки;  $N^*$  – относительная скорость сушки;  $Rb$  – число Ребиндера.

Относительная скорость сушки  $N^*$  во втором периоде зависит только от влагосодержания материала и не зависит от режима сушки [2, 5, 6, 8].

Поэтому уравнение (4) можно записать так:

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \left( \frac{\bar{u}}{u_{кр}} \right)^n \cdot \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| (1 + Rb), \quad (5)$$

где отношение  $\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left( \frac{\bar{u}}{u_{кр}} \right)^n$  учитывает уменьшение  $\bar{\alpha}$  в периоде падающей скорости сушки [2, 6],  $\Delta t_{II}/\Delta t_I$  – разности температур в первом и втором периодах сушки.

Скорость сушки [2]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K (\bar{u} - u_p), \quad (6)$$

где  $K = \frac{N}{\bar{u}_{кр} - u_p}$  – коэффициент сушки.

Подставляя в (6) уравнение (5):

$$\frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = \left( \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{-n} \cdot (1 + Rb), \quad (7)$$

и принимая приближенно  $\bar{u}_p = 0$ , из решения (7) получаем

$$q^* = \frac{q_{II}}{q_I} = \frac{\Delta t_{II}}{\Delta t_I} = \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n} \cdot (1 + Rb). \quad (8)$$

Пренебрегая числом Ребиндера  $Rb$  при малых его значениях  $Rb = 0,10 \div 0,15$  [7], определяем среднеинтегральную температуру во втором периоде из решения (8):

$$\bar{t} = t_c - (t_c - t_{м.т}) \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n}. \quad (9)$$

Для многих капиллярно-пористых материалов зависимость числа Ребиндера  $Rb$  от влагосодержания выражается формулой [7, 8]

$$Rb = A \cdot \exp \left[ -n_0 (\bar{u} - u_p) \right]. \quad (10)$$

Постоянные  $A$  и  $n_0$  зависят от вида материала и определяются экспериментально [2].

На рис. 2, а представлена обработка опытных данных по конвективной сушке натуральных кож для зависимости (10) при режимах, указанных в табл. 1, постоянная  $A = 0,15$ ;  $n_0 = 8,5$  [4, 11].

При мягких режимах сушки кож числа Ребиндера принимают значения  $Rb \approx 0,07 \div 0,15$ , причем максимальные значения  $Rb \approx 0,15$  соответствуют влагосодержанию  $\bar{u} \rightarrow u_p$ , когда процесс сушки необходимо прекращать для избегания перерасхода энергии на сушку [1, 2].

Плотность потока тепла в периоде убывающей скорости сушки при  $Rb = 0$  определяется уравнением

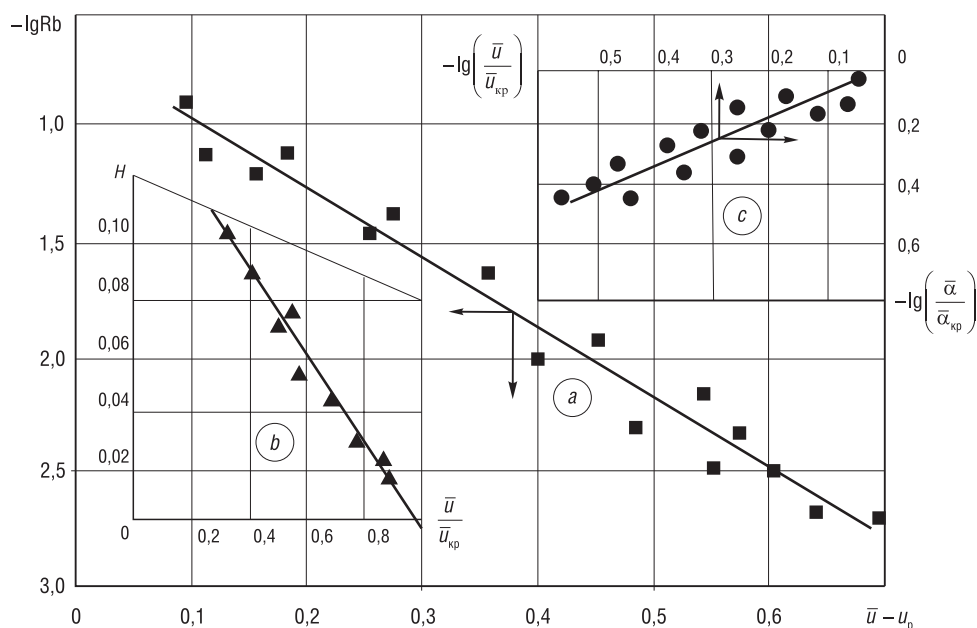


Рис. 2. Зависимости  $\lg Rb = f(\bar{u})$  (a), коэффициента  $H = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$  (b) и  $\lg(\bar{u}/\bar{u}_{кр}) = f(\lg(\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}))$  (c). Режимы обозначены в табл. 1 и 2

Fig. 2. Dependencies  $\lg Rb = f(\bar{u})$  (a), coefficient  $H = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$  (b) and  $\lg(\bar{u}/\bar{u}_{кр}) = f(\lg(\bar{\alpha}/\bar{\alpha}_{кр}))$  (c). Modes are indicated in tables 1 and 2

$$q_{II} = q_I \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^m = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^m, \quad (11)$$

где  $q_I = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N$  – плотность потока тепла в периоде постоянной скорости сушки,  $r$  – теплота парообразования,  $m = 1 - n$ .

В периоде падающей скорости сушки наступает регулярный тепловой режим по температурам, влагосодержанию и по тепловым потокам [2, 9–11].

При мягких режимах сушки тонких материалов значения тепломассообменных критериев  $Bi$  и  $Bi_m$  меньше 1 и в реальных условиях сушки зависят друг от друга, причем их численные значения приблизительно одинаковы [9]. При этом происходит быстрое выравнивание температур по поверхности и объему, и чем меньше значения этих критериев, тем быстрее все точки тела вступают в регулярный режим [9, 10]. В этих условиях лимитирующее влияние оказывает внешний тепломассообмен поверхности испарения материала с окружающей средой, при этом скорость сушки слабо зависит от внутреннего массопереноса (внешняя задача) [6, 9].

При значениях  $Bi < 1$  и мягких режимах сушки градиенты температуры по сечению влажного тела малы и термическим переносом вещества можно пренебречь [6, 9].

Уравнение теплового баланса тепла для второго периода сушки

$$q_{II} = c_{вл} \cdot \rho \cdot R_V \frac{d\bar{t}}{d\tau} + \rho \cdot r \cdot R_V \frac{d\bar{u}}{d\tau}. \quad (12)$$

Первый член в правой части уравнения (12) определяет поток тепла на нагрев влажного тела [2]. Балансовое уравнение тепла для нагрева влажного тела [5, 6]

$$c_{вл} \cdot \rho \cdot V \frac{d\bar{t}}{d\tau} = \bar{\alpha} (t_c - \bar{t}) F. \quad (13)$$

Решение (13) имеет вид [5, 6]

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_{м.т}} = \exp\left(-\frac{\bar{\alpha}}{c_{вл} \cdot \rho \cdot R_V} \tau_{II}\right), \quad (14)$$

где  $\frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}} \cdot \rho \cdot R_V} = m_t$  – темп нагрева твердого тела;  $\tau_{\text{II}}$  – время сушки во втором периоде, отсчитываемое от нуля.

Среднеинтегральная температура во втором периоде

$$\bar{t}(\tau) = t_c - (t_c - t_{\text{м.т}}) \exp(-m_t \cdot \tau_{\text{II}}). \tag{15}$$

Приближенное уравнение кривой кинетики сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  можно получить решением второго правого члена уравнения (12), для чего необходимо подставить в уравнение (12) уравнение (1) и темп убыли влагосодержания  $m_u$  [5].

Уравнение кривой сушки имеет вид

$$\bar{u}(\tau) = \bar{u}_0 - \frac{t_c - t_{\text{н}}}{t_{\text{м.т}} - t_{\text{н}}} \cdot N \left\{ \tau - \frac{1}{m_u} [1 - \exp(-m_u \cdot \tau)] \right\}. \tag{16}$$

В качестве примера приведем расчет кривой сушки краснотрубной юфти по уравнению (16) для режима  $t_c = 50$  °С,  $v = 1$  м/с и  $\phi = 45$  %:

$\tau$ , мин	37	45	60	68	84	108	136
$\bar{u}$	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,3	0,2
$u$ (16)	0,82	0,70	0,58	0,47	0,37	–	–

Видно, что при влагосодержании  $\bar{u} \rightarrow u_p$  кривая сушки не просчитывается. Формула (16) справедлива только до  $u \approx 0,25$ . При  $u < 0,25$  значительная часть тепла идет на нарушение связи влаги с материалом, и теплота парообразования  $r$  не соответствует действительной [1, 3].

Б. С. Сажиным разработан метод расчета кинетики сушки на основе единого кинетического уравнения, позволяющий описывать весь процесс, включая первый и второй периоды сушки [5, 6]. При этом численные значения всех параметров, входящих в уравнение кинетики, определяются на основе одной кинетической кривой с учетом условий проведения процесса. Коэффициент скорости сушки остается постоянной величиной как в первом, так и во втором периодах сушки. В этом методе расчета исключается необходимость определения коэффициента массопроводности или других кинетических характеристик [5].

В основу метода расчета положено обобщенное уравнение массопередачи, которое применительно к конвективной сушке можно представить в виде [5]

$$\frac{d\bar{u}}{d\tau} = K(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u} - u_p). \tag{17}$$

Произведение  $(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u} - u_p)$  представляет собой обобщенную комплексную переменную процесса сушки [5].

Интегрирование (17) от начального влагосодержания  $\bar{u}_0$  до конечного  $u_p$  с учетом влагосодержания прогрева материала  $\bar{u}_{\text{пр}}$  дает длительность сушки [5]

$$\tau = \frac{G}{K(\bar{u}_0 - \bar{u}_p)} \cdot \ln \left[ \frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{\text{пр}} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}})(\bar{u} - u_p)} \right], \tag{18}$$

где  $\bar{u}$  – текущее влагосодержание.

Величина  $\bar{u}_{\text{пр}}$  легко определяется на основе экспериментальной кривой сушки и температурной кривой (см. рис. 1). Уравнение (18) позволяет рассматривать кривую сушки как единый процесс, включая все периоды сушки. При этом нет необходимости определять критическое влагосодержание  $\bar{u}_{\text{кр}}$ , которое зависит от режима сушки [5]. Для тонких материалов период прогрева мал и часто принимается  $\bar{u}_{\text{пр}} \approx \bar{u}_0$  [5, 6].

Обозначим переменную в уравнении (18) через  $Z$ , где

$$Z = \ln \left[ \frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{\text{пр}} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}})(\bar{u} - u_p)} \right], \tag{19}$$

и запишем уравнение (18) в виде

$$\tau = \frac{\bar{u}_0}{K(\bar{u}_0 - \bar{u}_p)} \cdot Z. \quad (20)$$

В табл. 1 и 2 представлены результаты расчетов значений параметра  $Z$  и длительности сушки по уравнениям (19) и (20).

Т а б л и ц а 1. Результаты расчета параметра  $Z$  и длительности сушки по уравнениям (19) и (20) для процессов сушки краснудубной юфти и рантовой подошвы при различных режимах

Table 1. The results of the calculation of the parameter  $Z$  and the duration of drying according to equations (19) and (20) for the processes of drying of the red-bodied yuft (russian leather) and welt soles under various modes

Краснудубная юфть (пластина $200 \times 150 \times 2$ мм; $\rho_0 = 520$ кг/м <sup>3</sup> )											
1				2				3			
$t_c = 50$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 45$ %; $\bar{u}_0 = 1,14$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,67$ ; $u_p = 0,125$ ; $N \approx 0,013$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 50$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 30$ %; $\bar{u}_0 = 0,93$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,62$ ; $u_p = 0,097$ ; $N \approx 0,024$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 60$ °C; $v = 3$ м/с; $\varphi = 30$ %; $\bar{u}_0 = 0,93$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,60$ ; $u_p = 0,076$ ; $N \approx 0,036$ мин <sup>-1</sup>			
$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН	$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН	$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН
0,7	45	1,06	48,4	0,7	22	0,50	23,5	0,7	13	0,35	11,6
0,6	60	1,29	64,2	0,6	38	0,86	40,4	0,6	22,9	0,75	25,4
0,5	68	1,62	70,5	0,5	49	1,21	55,2	0,5	29,5	0,97	31,9
0,4	84	1,97	87,2	0,4	76	1,72	79	0,4	38,4	1,20	39,7
0,3	108	2,65	112	0,3	113	2,52	115	0,3	83,6	2,75	92
0,2	136	3,31	141	0,2	157	3,46	159	0,2	158	4,7	157
4				5				6			
$t_c = 50$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 45$ %; $\bar{u}_0 = 0,97$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,67$ ; $u_p = 0,120$ ; $N \approx 0,009$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 40$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 60$ %; $\bar{u}_0 = 1,40$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,78$ ; $u_p = 0,150$ ; $N \approx 0,008$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 60$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 40$ %; $\bar{u}_0 = 0,98$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,64$ ; $u_p = 0,120$ ; $N \approx 0,010$ мин <sup>-1</sup>			
$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН	$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН	$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН
–	–	–	–	0,9	55	1,15	54,2	–	–	–	–
0,7	49	0,82	47,5	0,8	70	1,45	68,2	–	–	–	–
0,6	68	1,21	70,2	0,6	117	2,35	117,5	0,6	50	1,31	50,5
0,5	89	1,63	92,7	0,5	135	2,64	132,4	0,5	68	1,81	69,7
0,4	119	2,13	121,4	0,4	175	3,50	175,2	0,4	95	2,45	94,8
0,3	150	2,63	151,3	0,3	210	4,20	210,5	0,3	125	3,20	123,7
0,2	195	3,45	197,7	0,25	275	5,45	272,6	0,25	150	3,91	154,8
Рантовая подошва (пластина $200 \times 200 \times 4,2$ мм; $\rho_0 = 980$ кг/м <sup>3</sup> )											
1				2				3			
$t_c = 40$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 50$ %; $\bar{u}_0 = 0,88$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,60$ ; $u_p = 0,135$ ; $N \approx 0,0014$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 50$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 50$ %; $\bar{u}_0 = 0,79$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,62$ ; $u_p = 0,120$ ; $N \approx 0,0022$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 60$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 50$ %; $\bar{u}_0 = 0,78$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,60$ ; $u_p = 0,125$ ; $N \approx 0,008$ мин <sup>-1</sup>			
$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН	$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН	$\bar{u}$	$\tau_{\text{эксп}}$ , МИН	$Z$	$\tau_{\text{расч}}$ , МИН
0,60	125	0,58	126,4	0,65	82	0,63	82,5	0,60	95	0,89	97
0,53	177	0,82	178,7	0,50	152	1,20	155,8	0,53	126	1,16	126,5
0,45	232	1,08	235,2	0,40	220	1,72	225,3	0,45	165	1,55	169
0,37	310	1,46	316,5	0,30	322	2,48	324,9	0,37	215	1,99	217
0,30	400	1,85	403,3	0,25	400	3,11	404,5	0,30	278	2,58	281
0,23	515	2,38	517,4	0,20	490	3,98	498	0,23	362	3,35	365,5

Т а б л и ц а 2. Результаты расчета параметра  $Z$  и длительности сушки по уравнениям (19) и (20) для процессов сушки стелечного полуваля и хромового опойка при различных режимах  
 T a b l e 2. The results of the calculation of the parameter  $Z$  and the duration of drying according to equations (19) and (20) for the processes of drying of the insole plowed and chromic calf leather in different modes

Стелечный полувал (пластина 200×150×2,8 мм; $\rho_0 = 700$ кг/м <sup>3</sup> )											
1				2				3			
$t_c = 60$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 60$ %; $\bar{u}_0 = 1,13$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,78$ ; $u_p = 0,145$ ; $N \approx 0,0129$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 40$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 60$ %; $\bar{u}_0 = 1,22$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,72$ ; $u_p = 0,140$ ; $N \approx 0,011$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 40$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 40$ %; $\bar{u}_0 = 1,13$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,77$ ; $u_p = 0,110$ ; $N \approx 0,011$ мин <sup>-1</sup>			
$\bar{u}$	$\tau_{\text{экср, мин}}$	$Z$	$\tau_{\text{расч, мин}}$	$\bar{u}$	$\tau_{\text{экср, мин}}$	$Z$	$\tau_{\text{расч, мин}}$	$\bar{u}$	$\tau_{\text{экср, мин}}$	$Z$	$\tau_{\text{расч, мин}}$
0,9	32	0,53	33,5	0,9	62	1,04	63,4	0,8	27	0,85	27,2
0,7	61	0,98	61,8	0,7	93	1,54	94,2	0,7	36	1,18	37,7
0,5	92	1,48	93,5	0,5	140	2,34	142,6	0,6	43	1,41	45
0,4	118	1,96	123,8	0,4	176	2,9	176,9	0,4	62	2,0	64
0,25	195	3,16	198,5	0,25	255	4,2	256,7	0,2	110	3,5	112
Хромовый опоек (пластина 150×80×0,9 мм; $\rho_0 = 450$ кг/м <sup>3</sup> )											
1				2				3			
$t_c = 50$ °C; $v = 1,5$ м/с; $\varphi = 27$ %; $\bar{u}_0 = 1,60$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,85$ ; $u_p = 0,110$ ; $\bar{u}_{пр} = 1,45$ ; $N = 0,025$ мин <sup>-1</sup>				$t_c = 60$ °C; $v = 0,5$ м/с; $\varphi = 50$ %; $\bar{u}_0 = 2,0$ ; $\bar{u}_{кр} = 1,0$ ; $u_p = 0,120$ ; $\bar{u}_{пр} \approx 1,85$ при $\bar{u}_{кр} < 1$ ; $t_c = 45$ °C; $\varphi = 30$ %; $u_p = 0,220$ ; режим переменный				$t_c = 45$ °C; $v = 1$ м/с; $\varphi = 27$ %; $\bar{u}_0 = 1,8$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,9$ ; $u_p = 0,080$ ; $\bar{u}_{пр} \approx 1,67$ ; $N = 0,031$ мин <sup>-1</sup>			
$\bar{u}$	$\tau_{\text{экср, мин}}$	$Z$	$\tau_{\text{расч, мин}}$	$\bar{u}$	$\tau_{\text{экср, мин}}$	$Z$	$\tau_{\text{расч, мин}}$	$\bar{u}$	$\tau_{\text{экср, мин}}$	$Z$	$\tau_{\text{расч, мин}}$
1,2	39	0,85	38,0	1,6	23	0,85	22,6	1,2	20	1,14	20,8
1,0	60	1,32	59,1	1,4	32	1,27	33,7	1,0	26	1,42	27,2
0,8	78	1,75	78,3	1,0	52	1,98	52,7	0,8	35	1,94	36,5
0,6	108	2,37	106,2	0,8	69	2,65	70,6	0,6	45	2,41	45,5
0,4	137	2,98	134,5	0,6	87	3,38	89,9	0,4	56	3,1	58,1
0,2	195	4,3	192,5	0,4	125	4,79	127,8	0,2	79	4,2	80,2

В системе координат  $Z = f(\tau)$  (где  $Z$  по формуле (19)) все кривые кинетики сушки являются прямыми, углы наклона которых представляют собой константу скорости сушки  $K$ , а отрезки, отсекаемые на оси  $Z$ , – величину  $\bar{u}_{пр}$  [5]. На рис. 3 дана зависимость  $Z = f(\tau)$  для ряда различных видов натуральных кож. Обозначения режимов сушки на рис. 3 соответствует обозначениям режимов в табл. 1.

Поскольку все кинетические характеристики сушки являются функциями влагосодержания и изменяются во времени, то кинетику сушки удобно рассчитывать по параметру  $Z$ . Среднеинтегральную температуру в периоде убывающей скорости сушки можно вычислить на основе параметра  $Z$  по уравнению

$$\bar{t}(\tau) = t_c - (t_c - t_{m.t}) \exp(-H \cdot Z). \tag{21}$$

**Обработка опытных данных.** Обработка опытных данных по конвективной сушке кож показана на рис. 2, *b*. Установлено, что коэффициент  $H$  является линейной функцией отношения  $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$  и аппроксимируется формулой

$$H = D \left( 1 - \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right).$$

Коэффициент  $D$  при сушке натуральных кож не зависит от режима сушки и равен  $D = 0,18$ .

При обработке результатов опытов по методу Б. С. Сажина и регулярного режима был использован первичный материал в виде кривых сушки и температурных кривых из [3] для различных видов натуральных кож.

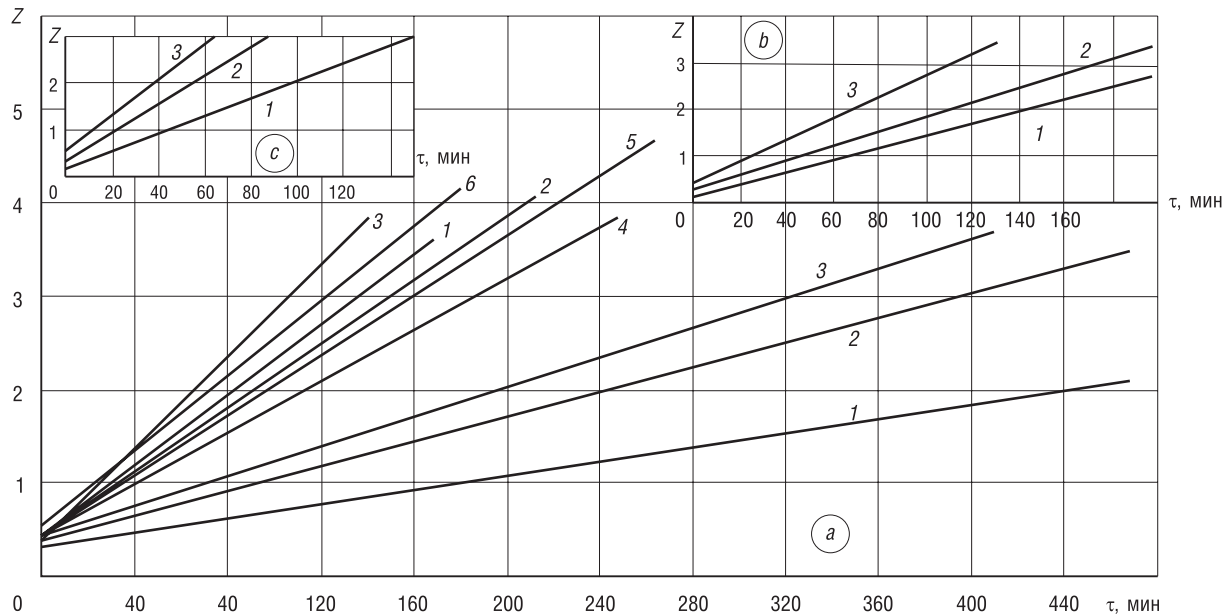


Рис. 3. Зависимость  $Z = f(\tau)$  в процессах сушки краснудобной юфти, рантовой подошвы (а), стелечного полуваля (b) и хромового опойка (с) при различных режимах сушки в соответствии с обозначениями режимов, приведенными в табл. 1 и 2

Fig. 3. Dependence  $Z = f(\tau)$  in the processes of drying of the red-bodied yuft (russian leather), welt soles (a), insole plowed (b) and chromic calf leather (c) for different drying modes in accordance with the designations of the modes given in Tables 1 and 2

Согласно аналогии процессов тепло- и массопереноса для регулярного режима в периоде падающей скорости сушки можно для определения темпа нагрева тела  $m_t$  и убыли влагосодержания  $m_u$  использовать следующие выражения [9–11]:

$$m_t = \frac{\bar{\alpha}}{c_{\text{вл}} \cdot \rho \cdot R_V}, \quad m_u = \frac{\bar{\alpha}_m}{c_m \cdot \rho \cdot R_V},$$

где  $\bar{\alpha}_m$  – коэффициент массообмена,  $c_m$  – удельная массоемкость влажного тела.

Темп нагрева тела  $m_t$  и темп убыли влагосодержания  $m_u$  находятся экспериментально путем измерения температуры и влагосодержания в любых точках влажного тела для двух последовательных моментов времени в условиях регулярного режима [9–11].

Обработкой большого числа экспериментов по сушке различных видов натуральных кож в широком диапазоне изменения режимных параметров сушки установлены приближенные зависимости для темпа нагрева влажных кож  $m_t$  и темпа убыли влагосодержания  $m_u$ , которые аппроксимируются уравнениями [4, 11]:

$$m_t \approx 0,105 \cdot \exp\left(-(\bar{u}_{\text{кр}} - u_p)\right), \quad (22)$$

$$m_u \approx 8,7 \cdot N \cdot \exp(-\bar{u}_0). \quad (23)$$

Представляет интерес в развитии теории сушки рассмотреть вопрос определения коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}$  в процессе сушки. При отсутствии критериальных уравнений для расчета коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}$  А. В. Лыковым на основе обработки опытных кривых сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  совместно с температурными кривыми  $\bar{t} = f(\bar{u})$  была получена формула [3]

$$\bar{\alpha} \approx \frac{\left[ (c_0 + c_{\text{ж}} \cdot \bar{u}) \frac{d\bar{t}}{d\bar{u}} + r \right] \cdot j}{t_c - \bar{t}}, \quad \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°C}, \quad (24)$$

где  $c_0 + c_{\text{ж}} \cdot \bar{u} = c_{\text{вл}}$  – удельная теплоемкость влажного материала;  $d\bar{t}/d\bar{u}$  – скорость увеличения температуры, определяемая графическим дифференцированием кривой  $\bar{t} = f(\bar{u})$ ;  $\bar{t}$  – средняя температура для текущего влагосодержания  $\bar{u}$ .



Исходя из современного состояния развития теории сушки и введенного в практику сушки А. В. Лыковым числа Ребиндера  $Rb$ , уравнение (24) принимает вид

$$\bar{\alpha} \approx \frac{[(1 + Rb) \cdot r] \cdot j}{t_c - \bar{t}} \approx \frac{r \cdot j}{t_c - \bar{t}}. \quad (25)$$

При сушке натуральных кож при мягких режимах значениями числа  $Rb \approx 0,10 \div 0,15$  можно пренебречь [4, 7, 11].

Интенсивность испарения влаги в периоде постоянной скорости сушки [2, 4, 11]

$$j_I = \frac{q_I}{r} = \frac{r \cdot \rho \cdot R_v \cdot N}{r} = \rho \cdot R_v \cdot N. \quad (26)$$

Интенсивность испарения в периоде падающей скорости сушки [2]

$$j_{II} \approx \rho \cdot R_v \cdot N \left( \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right) \approx j_I \left( \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right). \quad (27)$$

Обработкой большого объема экспериментальных данных по конвективной сушке различных материалов получена формула для теплообменного критерия Нуссельта [1, 2, 6]

$$Nu = B \cdot Re^{0,5} \cdot \left( \frac{T_c}{T_{м.т}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n, \quad (28)$$

где  $T_c$  и  $T_{м.т}$  – абсолютные температуры среды и мокрого термометра; отношение  $\left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n$  учитывает уменьшение коэффициента теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  в периоде убывающей скорости сушки [2, 6].

Обработкой данных по конвективной сушке кож в широком диапазоне изменения режимных параметров сушки установлено значение коэффициентов в уравнении (28):  $B \approx 0,9$ ;  $n = 0,65$ . На рис. 2, с приводится обработка результатов эксперимента для зависимости  $\lg(\bar{u} / \bar{u}_{кр}) = f(\lg(\bar{\alpha} / \bar{\alpha}_{кр}))$  по конвективной сушке натуральных кож [4, 11]. Сопоставление значений  $\bar{\alpha}$  по уравнениям (24) и (28), полученных при сушке красnodубной юфти при различных режимах, показало хорошее совпадение этих значений и дано в табл. 3.

**Т а б л и ц а 3. Зависимость коэффициента теплообмена  $\bar{\alpha}$  от влагосодержания красnodубной юфти в процессах конвективной сушки, полученные по уравнениям (28) и (24) при различных режимах**

**Table 3. Dependence of the heat transfer coefficient  $\bar{\alpha}$  on the moisture content of the red-bodied yuft (russian leather) in the processes of convective drying, obtained by equations (28) and (24) with different modes**

$t_c, ^\circ\text{C}$	40	40	50	50	50	50	60	60	50
$\varphi, \%$	40	60	80	40	45	45	45	45	45
$v, \text{м/с}$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	3	4	0,5	1
$\bar{u}$	Коэффициент теплоотдачи $\bar{\alpha}$ , Вт/м <sup>2</sup> ·°C, числитель (28), знаменатель (24)								
0,80	11,5	8,3	5,4	11,5	10,5	27,5	30,0	14,8	16,5
	10,4	9,4	4,6	10,8	9,5	25,4	28,6	12,6	16,7
0,70	11,2	8,1	5,8	11,0	10,8	27,3	30,0	14,7	16,2
	10,4	9,3	4,8	10,8	10,2	25,4	28,6	12,6	16,6
0,60	9,2	7,2	4,2	11,5	9,6	27,0	27,0	13,5	13,6
	9,6	8,3	3,8	10,3	10,5	25,2	27,2	11,8	14,2
0,50	8,8	6,5	3,9	9,6	8,9	25,0	24,5	10,9	12,8
	8,6	7,2	3,4	8,9	9,2	23,3	23,7	10,3	13,2
0,40	7,9	5,7	2,9	8,8	8,6	23,0	22,6	9,8	11,6
	7,3	6,2	2,7	7,7	8,4	21,2	20,3	8,8	11,2
0,30	7,3	5,8	2,5	7,8	7,2	19,5	18,4	8,4	9,8
	5,9	4,6	2,2	6,5	6,8	16,7	16,8	6,8	9,1
0,25	6,2	3,1	–	6,5	3,5	16,0	16,4	6,5	8,1
	5,2	3,9	–	5,4	3,9	13,8	14,7	6,1	7,9

Интенсивность испарения влаги во втором периоде сушки можно также определить на основе обобщенной переменной  $\exp(-m_t \tau_{II})$  по уравнению

$$j_{II} = j_I \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^n \exp(-m_t \tau_{II}), \quad (29)$$

где  $\tau_{II}$  – длительность сушки во втором периоде [4, 11]

$$\tau_{II} = \frac{1}{m_u} \ln \left( \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right), \quad \bar{u} < u_{кр}, \quad (30)$$

где  $\bar{u}_{кр}$  – влагосодержание в точке перехода от первого периода ко второму (см. рис. 1).

В табл. 4 дана проверка достоверности полученных уравнений. Видно, что погрешность вычислений параметров кинетики сушки находится в пределах точности обработки экспериментальных данных.

Т а б л и ц а 4. Проверка достоверности полученных расчетных уравнений

Table 4. Validation of the obtained calculation equations

Краснодубная юфта (пластина $200 \times 150 \times 2$ мм; $\rho_0 = 520$ кг/м <sup>3</sup> )								
$\bar{u}_0 = 1,14; \bar{u}_{кр} = 0,65; \bar{u}_p = 0,125; N = 0,013$ мин <sup>-1</sup> .								
Режим сушки: $t_c = 50$ °С; $v = 1,0$ м/с; $\varphi = 45$ %; $t_{м.т} = 35$ °С								
$\bar{u}$	$\bar{t}_{экс}$ , °С	$\bar{t}$ , °С (9)	$t$ , °С (15)	$t$ , °С (21)	$q_{II}$ , Вт/м <sup>2</sup> (8)	$j_{II} \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>2</sup> · с (28)	$j_{II} \cdot 10^{-3}$ , кг/м <sup>2</sup> · с (30)	$\tau_{II}$ , мин (31)
0,6	35,5	35,5	35,8	35,8	525	0,208	0,206	11,0
0,5	36,5	36,4	36,7	36,3	492	0,174	0,180	21,5
0,4	37,0	37,3	37,2	37,0	450	0,139	0,142	40,0
0,3	38,0	38,4	38,7	38,5	408	0,128	0,130	68,0
0,2	40,0	40,2	39,9	40,0	362	0,045	0,060	96,0

**Заключение.** Изложены результаты исследования конвективной сушки натуральных кож в широком диапазоне режимных параметров сушки. На основе обработки опытных данных методом кинетики сушки Б. С. Сажина и элементов теории регулярного теплового режима получены уравнения для расчета основных характеристик кинетики процесса. Проведена оценка достоверности полученных уравнений и сопоставление расчетных и экспериментальных значений параметров кинетики сушки по приведенным уравнениям. Полученные результаты исследования сушки натуральных кож позволяют контролировать технологический процесс, не допуская пересушивания кож, нарушения температурного режима, что позволяет сократить расход энергии на сушку.

#### Список использованных источников

1. Кавказов, Ю.Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю.Л. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
2. Лыков, А.В. Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 590 с.
3. Лыков, А.В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А.В. Лыков. – М.: Гизлегпром, 1938. – 776 с.
4. Ольшанский, А.И. Исследование кинетики конвективной сушки натуральных кож / А.И. Ольшанский, А.Л. Климентьев, В.В. Петренко // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2018. – № 1 (34). – С. 49–62.
5. Сажин, Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
6. Акулич, П.В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П.В. Акулич. – Минск: Беларус. наука, 2010. – 443 с.
7. Лыков, А.В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А.В. Лыков, П.С. Куц, А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1972. – Т. 23, № 3. – С. 401–406.
8. Ольшанский, А.И. Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным влагообмена / А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 887–897.
9. Лыков, А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 535 с.
10. Ольшанский, А.И. Регулярный тепловой режим нагревания влажных плоских капилляропористых материалов в процессе их сушки / А.И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 6. – С. 1308–1318.
11. Ольшанский, А.И. Исследование сушки натуральной кожи методом регулярного режима и обобщенными комплексными переменными / А.И. Ольшанский, А.Л. Климентьев // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2017. – № 1 (32). – С. 88–98.

## References

1. Kavkazov Y. L. *Heat and Mass Transfer in the Technology of Leather and Shoes*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
2. Lykov A. V. *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 590 p. (in Russian).
3. Lykov A. V. *Kinetics and Dynamics of Drying and Moistening Processes*. Moscow, Gizlegprom Publ., 1938. 776 p. (in Russian).
4. Ol'shanskii A. I., Klimentyev A. L., Petrenko V. V. Study of the kinetics of convective drying of natural leathers. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2018, no. 1 (34), pp. 49–62 (in Russian).
5. Sazhin B. S. *Basics of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 320 p. (in Russian).
6. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchangers*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
7. Lykov A. V., Kuts P. S., Ol'shanskii A. I. Kinetics of heat transfer in the process of drying wet materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 401–406.
8. Ol'shanskii A. I. The study of heat transfer in the process of drying wet materials on the basis of experimental data of moisture exchange. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 4, pp. 917–928. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1089-y>
9. Lykov A. V., Mihajlov Y. A. *Heat and Mass Transfer Theory*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 535 p. (in Russian).
10. Ol'shanskii A. I. Regular thermal mode of heating of wet flat capillary-porous materials during their drying. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 6, pp. 1362–1373. <https://doi.org/10.1007/s10891-014-1139-5>
11. Ol'shanskii A. I., Klimentyev A. L. The study of the drying of natural leather by the method of regular mode and generalized complex variables. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2017, no. 1 (32), pp. 88–98 (in Russian).

## Информация об авторах

*Ольшанский Анатолий Иосифович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@tut.by

*Климентьев Андрей Леонидович* – старший преподаватель кафедры технологии и оборудования машиностроительного производства, Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: klimentyev.vstu@gmail.com

## Information about the authors

*Anatoly I. Alshansky* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@tut.by

*Andrej L. Klimentyev* – Senior Lecturer of the Department of Technology and Equipment of Machine-Building Production, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: klimentyev.vstu@gmail.com

**А. И. Кицак**

*НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

### **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТУШЕНИЯ ПОЖАРА ОГNETУШАЩИМ ПОРОШКОМ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ НЕСТАЦИОНАРНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ЕГО ЧАСТИЦ С ГОРЯЩИМ ВЕЩЕСТВОМ**

**Аннотация.** Определена эффективность тушения пожара струйными системами порошкового пожаротушения в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени. Исследование осуществлялось методом теоретического моделирования механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка. Установлено, что тушение пламени огнетушащим порошком в нестационарных условиях происходит тем эффективнее, чем меньше эффективный размер частиц порошка, чем больше время пребывания их в зоне горения и чем меньше характерные длительности передачи тепла частицам порошка и реакции ингибирования центров пламени. Сопоставление проведенных оценок характерных длительностей теплопереноса и реакции ингибирования для широко применяемых в настоящее время огнетушащих порошков показало большую инерционность теплового механизма тушения пожара, что сильно снижает его эффективность при больших скоростях частиц порошка в зоне горения.

**Ключевые слова:** огнетушащий порошок, тепловое тушение, гетерогенное ингибирование, тепловая релаксация, длительность ингибирования

**Для цитирования:** Кицак, А. И. Эффективность тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения при нестационарном взаимодействии его частиц с горящим веществом / А. И. Кицак // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 476–486. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-476-486>

**Anatoli I. Kitsak**

*Research Institute of Fire Safety and Emergencies of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

### **EFFICIENCY OF FIRE EXTINGUISHING WITH GENERAL PURPOSE FIRE EXTINGUISHING POWDER IN CASE OF NON-STATIONARY INTERACTION OF ITS PARTICLES WITH BURNING MATERIAL**

**Abstract.** Evaluation of the effectiveness of fire extinguishing by jet systems of powder fire extinguishing in conditions of non-stationary heat exchange processes and heterogeneous inhibition of active flame centers by powder particles was the aim of the work. The theoretical dependence of the amount of heat, absorbed by the particles of fire extinguishing powder, and the reaction rate of heterogeneous active centers of flame, inhibiting them, in non-stationary conditions of heat transfer, as well as inhibition reaction for fire extinguishing ink jet systems were obtained. The extinguishing of a flame with a fire extinguishing powder under non-stationary conditions is more effective, the smaller is the effective size of the powder particles, the longer is their stay in the combustion zone, and the shorter are the characteristic times of heat transfer and inhibition reaction. Comparison of the estimates of the characteristic duration of heat transfer and inhibition reaction for widely used fire extinguishing powders has shown a large inertia of the thermal mechanism of fire extinguishing, which greatly reduces its effectiveness at high speeds of powder particles in the combustion zone.

**Keywords:** fire extinguishing powder, thermal extinguishing, heterogeneous inhibition, thermal relaxation, duration of inhibition

**For citation:** Kitsak A.I. Efficiency of fire extinguishing with general purpose fire extinguishing powder in case of non-stationary interaction of its particles with burning material. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 476–486 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-476-486>

**Введение.** Порошковое пожаротушение целенаправленно применяется на практике уже более полувека. Большая востребованность порошков как огнетушащего материала обусловлена рядом существенных преимуществ их над другими огнетушащими средствами [1–4].

Тушение пожара огнетушащим порошком обеспечивается двумя основными процессами: передачей тепла частицам порошка посредством их нагрева и химическим ингибированием продуктов горения либо поверхностью частиц порошка (гетерогенное ингибирование), либо веществами, образующимися при их испарении или разложении в результате поглощения тепла (гомогенное ингибирование).

Исследованию огнетушащей способности порошков посвящено множество экспериментальных и теоретических работ [5–9]. На их основе разработан ряд эффективных порошковых составов, способных потушить любой из известных классов пожаров.

Несмотря на большие успехи в технологии производства порошковых огнетушащих сред и внедрения их в практику, существует ряд факторов порошкового пожаротушения, требующих дальнейшего изучения физики и технологии тушения пожаров порошками. Одним из таких факторов является отсутствие единого представления о вкладе в результат тушения пожара каждого из огнетушащих механизмов порошка. Однозначное понимание роли этих механизмов позволило бы в конкретных случаях тушения пожара создать наиболее благоприятные условия его тушения. В настоящее время предполагается, что доминирующим механизмом огнетушащего действия порошков является способность их ингибировать пламя пожара, в частности гетерогенное ингибирование, заключающееся в восстановлении на поверхности частиц порошка активных центров пламени, которыми являются свободные атомы и радикалы горючего вещества.

Одним из доказательств преобладания гетерогенного механизма ингибирования пламени является зависимость эффективности тушения пожара от дисперсности частиц порошка. Отмечается, например, что если бы доминировал тепловой механизм тушения пожара, то порошки с разной дисперсностью частиц мало бы отличались друг от друга по огнетушащей способности, хотя на практике различие между ними весьма заметное [1].

Другим фактором порошкового пожаротушения, требующим критического (с точки зрения особенностей взаимодействия частиц порошка с горючим материалом) анализа, является сильная зависимость результатов тушения пожара от условий применения порошка и режимов подачи его в зону пожара.

На зависимость результата тушения пожара порошком от условий подачи его в зону горения неоднократно обращалось внимание во многих работах [1–4]. Однако, как следует из литературных данных, попыток выяснения причин происходящего не предпринималось.

Анализ схем тушения пожара порошками показывает, что подача порошка в зону горения производится в основном пневматическим способом. Он реализуется различными схемами в модулях порошкового пожаротушения (МПП), ручных и переносных огнетушителях, а также лафетных установках порошкового пожаротушения.

Скорость частиц порошка, выбрасываемого из таких устройств, в газообразном горящем слое может достигать нескольких метров в секунду [2, 10]. При толщине слоя  $\sim 0,1\div 0,2$  мм длительность  $t_{\text{int}}$  взаимодействия частиц порошка с активными центрами пламени в этой зоне составляет  $\sim 10^{-4}\div 10^{-5}$  с [2]. В то же время нагрев частиц порошка и гетерогенный обрыв цепей горения не происходят мгновенно. По оценкам, приведенным в работе [1], длительность прерывания цепи (промежуток времени от момента появления активной частицы продукта горения до момента восстановления на поверхности частицы порошка)  $\tau$  составляет порядка  $\sim 10^{-4}$  с. Время нагрева частиц составляет примерно такую же величину [10].

Из сопоставления времени пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени и времени протекания основных механизмов тушения пожара следует, что они примерно одного порядка. Поэтому можно предположить, что процесс тушения пожара огнетушащим порошком с применением установок пожаротушения со струйной подачей порошка во фронт пламени часто происходит в нестационарных условиях.

*Целью настоящей работы* является оценка эффективности тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени.

**Физическая модель тушения пожара струйными устройствами подачи огнетушащего порошка в зону горения.** Рассмотрим схему тушения пожара струей огнетушащего порошка, подаваемой в зону горения по направлению к фронту пламени.

В некоторый момент времени в этой зоне [11], которая состоит из областей подогрева горючей среды, реакции горения и собственно пламени (светящейся зоны), сформируется дисперсный слой частиц порошка. Частицы огнетушащего порошка, попавшие в область реакции горения, покидают ее за промежуток времени  $t_{int}$ , зависящий от скорости частиц порошка и эффективной толщины зоны реакции. Они покидают реакционную область безвозвратно, если горючим веществом является горючий газ (ГГ) или легковоспламеняющаяся жидкость (ЛВЖ). Когда осуществляется тушение твердого горючего материала (ТГМ), часть частиц порошка может осесть в обуглившимся зазорах материала, а часть, обладающая достаточной кинетической энергией, – отразиться от материала, снова попасть в реакционную область горения или покинуть ее.

За время пребывания частиц порошка в реакционной области они нагреваются до определенной температуры в соответствии с их теплофизическими и дисперсными характеристиками и адсорбируют на своей поверхности с некоторой вероятностью, зависящей от физико-химических характеристик материала и состояния их поверхности, активные центры пламени, состоящие из свободных атомов и радикалов горючего вещества.

Нагрев частиц порошка приводит к проявлению двух условных форм теплового механизма тушения пожара: охлаждению зоны горения увеличением теплоотвода от горючего вещества и уменьшению теплоотдачи от него. Первая из этих форм реализуется при расходе поглощенного частицами порошка тепла на их расплав и отдачу его теплопередачей в окружающую среду. Вторая форма теплового механизма тушения пожара выражается в терморазложении частиц порошка на составляющие компоненты, которые затем связывают (ингибируют) активные центры пламени и, таким образом, снижают теплоотдачу горючего материала.

Адсорбированные поверхностью частиц порошка активные центры пламени рекомбинируют с другими активными частицами пламени, достигшими этой поверхности. В результате формируются неактивные частицы (молекулы) из родственных или неродственных атомов либо радикалов продуктов горения. Процесс гетерогенного ингибирования приводит к обрыву цепей горения и в результате к снижению тепловыделения.

Реакция гетерогенного ингибирования активных центров пламени осуществляется в каналах слоя, образованных частицами огнетушащего порошка в зоне горения.

Если условия подачи огнетушащего порошка во фронт пламени (интенсивность подачи или приведенная скорость, угол подачи) подобраны оптимально, так, что время пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени  $t_{int}$  больше, чем характерные временные промежутки протекания реакции ингибирования активных центров пламени  $\tau_{ing}$  и нагрева частиц порошка  $\tau_{rel}$ , то реализуется стационарный режим тушения пожара. В этом случае ингибирование активных центров пламени, равно как и нагрев частиц порошка, происходит наиболее эффективно, то есть частицы успевают ингибировать максимальное число центров пламени и нагреться до максимальных температур. В итоге тушение пожара происходит в благоприятных условиях.

Если же частицы порошка находятся в зоне реакции ограниченное время, такое, что  $t_{int} \leq \tau_{ing}$  и  $t_{int} \leq \tau_{rel}$ , то эффективность ингибирования и нагрева частиц, очевидно, будет зависеть от соотношения времени  $t_{int}$  и  $\tau_{ing}$ , а также  $t_{int}$  и  $\tau_{rel}$ .

**Модель теплового механизма тушения пожара огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена.** Определим количество теплоты  $Q$ , аккумулированной частицами порошка за время пребывания их в зоне реакции горения  $t_{int}$ . Для этого вначале найдем закон изменения температуры частицы порошка во времени  $t$  при попадании ее во фронт пламени.

Воспользуемся для этого одним из упрощенных подходов к решению задач теплопроводности, который относится к случаю, когда поле температур в твердом теле изменяется во времени, но в любой момент времени не изменяется по пространству. При передаче тепла к телу от нагретого слоя горящего газа конвекцией данный случай реализуется, если сопротивление теплопроводности в теле намного меньше сопротивления конвекции на его поверхности [12].

Математически это условие выражается в том, что число Био  $Bi$ , которое равно отношению кондуктивного термического сопротивления к конвективному термическому сопротивлению, должно быть намного меньше единицы [12], то есть

$$Bi = \frac{h_c d_p}{\lambda_p} \ll 1, 0, \quad (1)$$

где  $h_c$  – средний коэффициент конвективной теплопередачи на поверхности раздела теплового слоя и твердого тела, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $d_p$  – характерный размер тела, м;  $\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности тела, Вт/(м·К).

Параметр  $h_c$  можно оценить из соотношения для числа Нуссельта  $Nu$  при теплопередаче от нагретого слоя газа к частице порошка [2]. Имеем

$$Nu = \frac{h_c d_p}{\lambda_g}, \quad (2)$$

где  $\lambda_g$  – коэффициент теплопроводности горючего газа.

Число Нуссельта для тел очень малого размера равно  $\sim 2$  [2].

Проведенные оценки чисел Био для двух сортов огнетушащих порошков с преобладанием частиц бикарбоната натрия ( $\lambda_p = 4$  Вт/(м·К) [4]) и моноаммонийфосфата ( $\lambda_p = 0,25$  Вт/(м·К) [4]) показали, что при  $d_p = 50$  мкм и средней теплопроводности нагретого ( $\sim 700$  °С) газа (воздуха)  $\lambda_g = 6,71 \cdot 10^{-2}$  Вт/(м·К) они равны 0,033 и 0,530 соответственно. Видно, что условие (1) выполняется для частиц бикарбоната натрия с более высокой точностью, чем для частиц моноаммонийфосфата. Будем считать, что неравенство (1) выполняется условно для частиц обоих рассматриваемых сортов огнетушащих порошков.

В этом случае для определения зависимости изменения температуры частицы во времени при нахождении ее в зоне горения можно воспользоваться законом баланса энергии, аккумулированной частицей, и энергии, подводимой к поверхности частицы из зоны горения. Математически этот закон представляется в виде [12]

$$\rho V c_p \frac{dT(t)}{dt} = q(t), \quad (3)$$

где  $\rho$  – плотность материала частицы, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем частицы порошка, м<sup>3</sup>;  $c_p$  – удельная теплоемкость частиц порошка, Дж/(кг·К);  $T(t)$  – мгновенное значение температуры частицы, К;  $q(t) = h_c A_s (T_g - T(t))$  – мгновенный тепловой поток, передаваемый частице порошка от горючего газа с температурой  $T_g$ , К;  $A_s$  – площадь поверхности частицы, м<sup>2</sup>.

Решая уравнение (3) относительно  $T(t)$  при условии, что в начальный момент времени  $t = 0$  температура частицы равна  $T_p$ , получим следующее соотношение для мгновенного значения температуры частицы:

$$T(t) = T_g + (T_p - T_g) \exp \left[ -\frac{h_c}{\rho d_p c_p} t \right], \quad (4)$$

где  $d_p = \frac{V}{A_s}$  – характерный геометрический размер частиц порошка, м.

Определим количество тепла  $Q$ , аккумулированное частицами порошка за время пребывания их в зоне реакции горения  $t_{int}$ . Для этого проинтегрируем выражение  $q(t)$  в пределах от 0 до  $t_{int}$  с учетом (4) и просуммируем полученный результат по числу частиц, находящихся в зоне реакции за промежуток времени  $t_{int}$ .

В итоге получим

$$Q = m c_p (T_g - T_p) \left( 1 - \exp \left[ -Bi \frac{t_{int}}{\tau_{rel}} \right] \right), \quad (5)$$

где  $m$  – масса частиц порошка, находящихся в зоне горения в течение  $t_{\text{int}}$ ,  $\text{Bi} = \frac{h_c d_p}{\lambda_p}$  ( $\lambda_p$  – коэффициент теплопроводности материала частиц, Вт/(м·К)),  $t_{\text{int}} = \frac{l_{\text{int}}}{v}$  ( $l_{\text{int}}$  – эффективная длина взаимодействия частиц порошка с активными частицами в зоне реакции, м;  $v$  – скорость частиц в реакционной зоне, м/с);  $\tau_{\text{rel}} = \frac{d_p^2}{\alpha}$  – характерное время нагрева (охлаждения) материала частиц порошка, с;  $\alpha = \frac{\lambda}{c_p \rho}$  – коэффициент температуропроводности, м<sup>2</sup>/с.

Количество тепла  $Q_{\text{ext}}$ , поглощенное частицами порошка за время подачи порошка  $\tau_{\text{ext}}$  в зону горения, равно

$$Q_{\text{ext}} = J c_p (T_g - T_p) \left( 1 - \exp\left[-\text{Bi} \frac{t_{\text{int}}}{\tau_{\text{rel}}}\right] \right) S_{\text{ext}} \tau_{\text{ext}}, \quad (6)$$

где  $J = G/S_{\text{ext}}$  – интенсивность подачи порошка в зону горения, кг/(м<sup>2</sup>с);  $G$  – массовый расход порошка, кг/с;  $S_{\text{ext}}$  – площадь тушения пожара, м<sup>2</sup>.

Проведем анализ эффективности отбора тепла частицами огнетушащего порошка из зоны горения.

Из выражения (6) следует, что количество тепла, аккумулированного частицами порошка, зависит в общем случае как от их теплофизических характеристик, так и от дисперсности (характерных размеров) частиц и условий подачи в зону горения. Зависимость эффективности теплового механизма тушения пожара от характерных размеров частиц огнетушащего порошка проявляется через зависимость от данных размеров параметра  $\tau_{\text{rel}}$ , который характеризует скорость нагрева (охлаждения) материала частиц порошка. Из его определения следует, что скорость нагрева частиц порошка тем больше, чем меньше их характерные размеры, теплоемкость и плотность вещества, из которого они состоят, и чем больше теплопроводность.

Для эффективного охлаждения зоны горения необходимо, как следует из (6), чтобы время нахождения частиц в этой зоне  $t_{\text{int}}$  было больше времени  $\tau_{\text{rel}}$ .

Определим время  $\tau_{\text{rel}}$  для упомянутых выше типов огнетушащих порошков: бикарбоната натрия ( $c_p = 1030$  Дж/кг·К;  $\rho = 2020$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_p = 0,4$  Вт/(м·К) [4]) и моноаммонийфосфата ( $c_p = 1234$  Дж/кг·К;  $\rho = 1803$  кг/м<sup>3</sup>;  $\lambda_p = 0,025$  Вт/(м·К) [4]).

Для частиц с  $d_p \sim 50$  мкм значения  $\tau_{\text{rel}}$  равны 1,3 мс и 22,0 мс соответственно. С учетом числа Био, входящего в экспоненциальный множитель (6), значение  $t_{\text{int}}$  для эффективной передачи тепла должно быть больше 39 мс для частиц бикарбоната натрия и больше 44 мс для частиц моноаммонийфосфата. Как видно из полученных значений  $t_{\text{int}}$ , они практически равны для рассматриваемых типов огнетушащих порошков.

Что касается скорости  $v$  частиц порошков в зоне горения, при которой обеспечивается эффективный отбор тепла, то, согласно приведенным оценкам  $t_{\text{int}}$ , она не должна превышать 0,005 м/с для частиц с  $d_p \sim 50$  мкм и 0,120 м/с для частиц с  $d_p \sim 10$  мкм при толщине слоя горящего газа  $\sim 200$  мкм. При подаче струи порошка в зону горения под углом 60° к фронту горения эти скорости могут быть выше, но не более 0,01 и 0,24 м/с соответственно.

**Модель механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка при нестационарном взаимодействии.** Определим концентрацию  $C$  активных частиц реакции горения, адсорбированных поверхностью частиц слоя огнетушащего порошка.

Для этого воспользуемся приближенным методом решения задач диффузионной кинетики, получившим название метода равноступенной поверхности [13].

Следуя данному методу, запишем уравнение равенства потока  $m(C)$  активных частиц пламени, адсорбированных поверхностью частицы порошка, потоку активных частиц, доставляемых к этой поверхности в результате образовавшейся разности концентраций частиц возле поверхности ингибитора и внутри горючего газа, с учетом нестационарности процесса ингибирования.



Получим

$$m(C) = \beta \cdot (C - C_0) - \tau \frac{\partial m(C)}{\partial t}, \quad (7)$$

где  $C_0 = \frac{m_0}{V}$  – концентрация активных частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $m_0$  – начальная масса активных частиц в слое горючего газа, кг;  $V$  – объем горючего слоя газа, м<sup>3</sup>;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с;  $\tau$  – время протекания реакции ингибирования активных центров пламени, с.

Предположим, что реакция ингибирования на поверхности является реакцией первого порядка

$$m(C) = kC, \quad (8)$$

где  $k$  – кинетическая константа скорости реакции, м/с.

Проинтегрировав (7) с учетом (8) при условии, что в начальный момент времени  $t = 0$  концентрация ингибированных центров пламени  $C = 0$ , получим следующее уравнение для концентрации центров пламени, восстановленных на поверхности частицы порошка в заданный момент времени  $t$ :

$$C = \frac{\beta}{\beta + k} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right) \right) C_0, \quad (9)$$

где  $\Delta\tau = \tau k / (k + \beta)$  – эффективное время обрыва цепи горения, с.

Для скорости реакции ингибирования (массы активных частиц, восстанавливаемых в единицу времени) получим следующее уравнение:

$$\frac{dm}{dt} = kS_{ch}C = K^*S_{ch}C_0, \quad (10)$$

где  $S_{ch}$  – эффективная площадь поверхности каналов, образованных частицами огнетушащего порошка, в слое объемом  $V$ , м<sup>2</sup>;  $K^*$  – эффективная константа скорости реакции, равная

$$K^* = \frac{k\beta}{\beta + k} \left( 1 - \exp\left(-\frac{t}{\Delta\tau}\right) \right). \quad (11)$$

За время взаимодействия  $t_{int}$  масса  $m$  активных центров пламени, ингибированных поверхностью слоя частиц площадью  $S_{ch}$ , будет равна

$$m = \frac{k\beta}{\beta + k} S_{ch} C_0 \Delta\tau \left( \frac{t_{int}}{\Delta\tau} - \left( 1 - \exp\left(-\frac{t_{int}}{\Delta\tau}\right) \right) \right). \quad (12)$$

Проведем анализ полученной зависимости массы ингибированных центров пламени от условий тушения пожара.

Из (12) видно, что при стационарном взаимодействии активных центров пламени с поверхностью частицы, то есть когда  $t_{int} \gg \Delta\tau$ , масса ингибированных центров пламени стремится к максимально возможному значению за интервал времени  $t_{int}$ .

Если время взаимодействия  $t_{int} < \Delta\tau$ , то масса ингибированных центров пламени будет зависеть от соотношения  $t_{int} / \Delta\tau$ . При  $t_{int} \ll \Delta\tau$  она будет стремиться к нулю.

Выразим соотношение для  $m$  через кинетические параметры реакции ингибирования, дисперсные характеристики частиц огнетушащего порошка и параметров подачи его в зону пламени. Известно [14], что кинетическая константа скорости  $k$  равна

$$k = \frac{1}{4} \gamma u, \quad (13)$$

где  $\gamma$  – вероятность адсорбции активных частиц поверхностью дисперсной частицы;  $u$  – средняя тепловая скорость активной частицы, м/с.

Коэффициент массоотдачи  $\beta$  к поверхности частицы ингибирования определяется выражением [13]

$$\beta = \frac{Nu_d D}{d_{eq}}, \quad (14)$$

где  $Nu_d$  – критерий Нуссельта для процесса диффузии;  $D$  – коэффициент диффузии,  $m^2/c$ ;  $d_{eq}$  – эквивалентный диаметр каналов слоя, в которых происходит гетерогенная реакция, м.

Величину  $d_{eq}$  можно выразить через характеристики дисперсного слоя огнетушащих частиц. Согласно [15] имеем

$$d_{eq} = \frac{2F\varepsilon d_p}{3(1-\varepsilon)}, \quad (15)$$

где  $F$  – фактор формы частиц (для шарообразных частиц  $F=1$ );  $\varepsilon = (V - V_0)/V = 1 - \rho_n/\rho$  – порозность слоя;  $V$  – общий объем, занимаемый слоем частиц порошка,  $m^3$ ;  $V_0$  – объем, занимаемый частицами порошка в слое,  $m^3$ ;  $\rho_n$  – насыпная плотность частиц порошка,  $kg/m^3$ ;  $\rho$  – истинная плотность частиц порошка,  $kg/m^3$ ;  $d_p$  – диаметр эквивалентного шара, имеющего тот же объем, что и частица порошка, м.

Эффективная площадь  $S_{ch}$  поверхности каналов, образованных частицами слоя равна [15]

$$S_{ch} = SH \frac{6(1-\varepsilon)}{Fd_p}, \quad (16)$$

где  $S$  – площадь основания слоя дисперсных частиц в толще горючего газа,  $m^2$ ;  $H$  – высота слоя, м.

Известно [14, 15], что при протекании гетерогенной реакции наблюдаемая скорость реакции определяется, с одной стороны, истинной химической кинетикой на поверхности, а с другой – скоростью транспорта реагирующих веществ к этой поверхности молекулярной или конвективной диффузией. Если скорость реакции определяется в основном кинетическими процессами на поверхности ингибитора, отмечают, что реакция происходит в кинетической области. Другой предельной областью протекания гетерогенной реакции является диффузионная область. В этой области скорость реакции лимитируется процессом диффузии активных частиц к поверхности ингибитора.

Определим скорости гетерогенной реакции ингибирования активных частиц в указанных областях ее протекания.

*Кинетическая область.* Реакция в этой области протекает, когда вероятность адсорбирования  $\gamma$  атома или радикала поверхностью ингибитора при соударении с ней много меньше единицы, то есть  $\gamma \ll 1$  [14]. При этом активная частица до ее гибели может успеть много раз побывать как у поверхности, так и в середине канала слоя частиц, где происходит реакция. В этом случае концентрацию активных центров пламени можно считать приближенно постоянной во всем объеме горючего газа, и скорость обрыва цепей горения не будет зависеть от скорости диффузии активных центров к поверхности ингибитора.

В данном режиме реакции кинетическая константа скорости  $k \ll \beta$ , а время реакции ингибирования  $\tau$  будет определяться величиной, обратной константе скорости обрыва цепи [14], то есть

$$\tau = \frac{d_{eq}}{\gamma u}. \quad (17)$$

Используя определения (13)–(16), получим из (12) следующее выражение для относительной массы ингибированных центров пламени в кинетической области протекания реакции ингибирования за время  $t_{int}$ :

$$\frac{m}{m_0} = \frac{3(1-\varepsilon)}{2 Fd_p} \gamma u \Delta\tau \left( \frac{t_{int}}{\Delta\tau} - \left( 1 - \exp\left( -\frac{t_{int}}{\Delta\tau} \right) \right) \right), \quad (18)$$

где  $\Delta\tau = \tau k/\beta$  – эффективное время длительности реакции, которое равно

$$\Delta\tau = \frac{1}{9} \frac{d_p^2}{Nu_d D} \frac{\varepsilon^2 F^2}{(1-\varepsilon)^2}. \quad (19)$$

В случае диффузии активных частиц в неподвижной среде  $Nu_d \sim 1$  [14].

*Диффузионная область.* В этой области реакция протекает, когда  $\gamma \approx 1$ , то есть когда активная частица гибнет при первом же столкновении с поверхностью ингибитора. Скорость обрыва

цепи лимитируется диффузией атома или радикала к поверхности ингибитора. Концентрация атомов или радикалов на поверхности частиц порошка близка к нулю и максимальна в центре канала реакции. В данных условиях коэффициент массоотдачи  $\beta \ll k$ , а время длительности ингибирования будет определяться временем диффузии активных центров к поверхности ингибитора.

Время диффузии можно оценить из соотношения Эйнштейна  $4D\tau = d_{\text{eq}}^2$  [14]. Из него следует

$$\tau = \frac{d_{\text{eq}}^2}{4D}. \quad (20)$$

Учитывая особенности протекания реакции ингибирования в диффузионной области, получим следующее выражение для относительной массы ингибированных центров пламени:

$$\frac{m}{m_0} = 9 \frac{Nu_d D (1-\varepsilon)^2}{F^2 \varepsilon d_p^2} \Delta\tau \left( \frac{t_{\text{int}}}{\Delta\tau} - \left( 1 - \exp\left(-\frac{t_{\text{int}}}{\Delta\tau}\right) \right) \right), \quad (21)$$

где  $\Delta\tau = \tau$  и с учетом (20) равно

$$\Delta\tau = \frac{1}{9} \frac{d_p^2}{D} \frac{\varepsilon^2 F^2}{(1-\varepsilon)^2}. \quad (22)$$

Из полученных выражений для относительных масс ингибированных активных частиц в кинетической и диффузионной области протекания реакции ингибирования следует, что эффективность ингибирования определяется не только дисперсными характеристиками огнетушащего порошка и кинетическими параметрами активных центров, но и условиями тушения. Процесс обрыва цепей реакции горения частицами огнетушащего порошка происходит тем эффективнее, чем больше время взаимодействия  $t_{\text{int}}$  их с активными центрами пламени и чем меньше эффективная длительность реакции ингибирования  $\Delta\tau$ .

Длительности реакции ингибирования  $\Delta\tau$  в различных областях протекания ее, как следует из формул (19) и (22), практически совпадают. Причем эффективное время реакции ингибирования тем меньше, чем меньше диаметр частиц порошка, чем больше скорость диффузии активных центров пламени к поверхности ингибитора и чем меньше порозность частиц огнетушащего порошка в зоне горения.

Оценки величины  $\Delta\tau$  для атома кислорода с молярной массой  $\mu = 16 \cdot 10^{-3}$  кг/моль и диаметром  $1,5 \cdot 10^{-10}$  м показали, что она составляет  $\Delta\tau = 3,8 \cdot 10^{-5}$  с при атмосферном давлении  $P = 10^5$  Па, температуре в зоне горения  $T = 973$  К, диаметре частиц огнетушащего порошка  $d_p = 50$  мкм и порозности  $\varepsilon = 0,9$ . При порозности частиц  $\varepsilon = 0,5$ :  $\Delta\tau = 4,7 \cdot 10^{-7}$  с. В случае использования для тушения пожара порошка с диаметром частиц  $d_p = 10$  мкм и порозности его  $\varepsilon = 0,9$  величина  $\Delta\tau = 1,52 \cdot 10^{-6}$  с, а при  $\varepsilon = 0,5$  длительность реакции ингибирования равна  $\Delta\tau = 1,88 \cdot 10^{-8}$  с.

Из полученных оценок  $\Delta\tau$  следует, что для эффективного гетерогенного ингибирования атомов кислорода частицами порошка скорость  $v$  их при диаметре  $d_p = 50$  мкм, порозности в зоне реакции  $\varepsilon = 0,9$  и  $l_{\text{int}} = 200$  мкм должна быть меньше 5 м/с, а при  $\varepsilon = 0,5$ :  $v < 420$  м/с. При диаметре частиц огнетушащего порошка  $d_p = 10$  мкм и  $\varepsilon = 0,5$  процесс гетерогенного ингибирования атомов кислорода происходит фактически в стационарном режиме при любых достижимых скоростях частиц порошка в зоне реакции горения.

**Анализ основных закономерностей тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени.** Проведенные оценки эффективности основных механизмов тушения пожара огнетушащим порошком в условиях нестационарности процессов теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени позволили выяснить вклад этих механизмов в процесс тушения пожара и зависимость результата тушения от условий подачи порошка в зону горения.

Выявлено, что эффективность механизма теплового тушения пожара, как и механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени, зависит от характерных размеров частиц

порошка  $d_p$ . Эта зависимость проявляется, прежде всего, через зависимость характеристик инерционности этих процессов  $\tau_{rel}$  и  $\Delta t$  от  $d_p$ .

Как видно из определения  $\tau_{rel}$  и формул (19) и (22), параметры  $\tau_{rel}$  и  $\Delta t$  тем меньше (т. е. меньше инерционность механизмов), чем меньше характерный размер  $d_p$  частиц порошка.

Для струйных систем порошкового тушения пожара чем меньше инерционность механизмов тушения пожара, то есть чем ближе процесс тушения пожара к стационарному режиму, тем с большей скоростью можно подавать частицы порошка в зону горения и тем эффективнее (быстрее и надежнее) происходит ликвидация пожара.

Характерной особенностью является то, что в стационарном режиме тушения пожара ( $t_{int} \gg \Delta t$ ) эффективность теплового механизма тушения, как следует из формулы (6), не зависит от размера частиц порошка. В то же время эффективность механизма гетерогенного ингибирования активных центров пламени определяется размерами частиц как в нестационарном, так и в стационарном режиме тушения. Причем чем меньше размер частиц порошка, тем выше эффективность тушения.

Сопоставление приведенных оценок  $\tau_{rel}$  для частиц двух приведенных выше типов огнетушащих порошков и  $\Delta t$ , рассчитанных при тех же значениях характерных размеров частиц ( $d_p = 50 \div 10$  мкм), показывает, что при скоростях частиц порошка в зоне горения больше 0,24 м/с и толщине горючего слоя  $l_{int} = 200$  мкм механизм теплового тушения пожара может вообще не проявляться. В этом случае соответственно не осуществляется эффективный отбор тепла из зоны горения, не происходит гомогенное ингибирование активных центров пламени и не образуется пленка расплава порошка при тушении пожара подкласса А1. Процесс тушения пожара будет происходить преимущественно благодаря протеканию процесса гетерогенного ингибирования активных частиц пламени вследствие его меньшей инерционности.

Установленная зависимость эффективности механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных частиц пламени от скорости частиц огнетушащего порошка в зоне реакции позволяет объяснить более низкую эффективность тушения пожара МПП импульсного типа (время выброса порошка  $t_{dis} < 1$  с) по сравнению с МПП кратковременного действия ( $t_{dis} = 1 \div 10$  с) при одинаковой высоте расположения их над очагом пожара и одинаковым направлением струй во фронт пламени.

Сравнительно низкая эффективность установок порошкового пожаротушения импульсного типа обусловлена малым временем пребывания частиц порошка в реакционной зоне вследствие их большой скорости, которая может достигать десятков метров в секунду. Несмотря на то что скорости частиц порошка, подаваемого в зону пожара МПП кратковременного действия, могут быть примерно такой же величины, эффективный удельный расход ими порошка на тушение пожара больше эффективного удельного расхода порошка МПП импульсного типа благодаря большому на порядок времени выпуска (времени тушения) порошка в зону пожара.

Если условия подачи огнетушащего порошка во фронт пламени (интенсивность подачи или приведенная скорость, угол подачи) МПП подобраны оптимально, так, что время пребывания частиц порошка в реакционной зоне пламени больше, чем характерные временные промежутки протекания реакции ингибирования активных центров пламени и нагрева частиц порошка, то реализуется стационарный режим тушения пожара. В этом случае ингибирование активных центров пламени, равно как и нагрев частиц порошка, происходит наиболее эффективно, то есть частицы порошка успевают ингибировать максимальное число центров пламени и нагреваться до максимальных температур. Тушение пожара происходит в благоприятных условиях.

Полученные результаты дают также более естественное объяснение известного в пожаротушении парадокса, который заключается в увеличении удельного расхода огнетушащего порошка при повышении интенсивности подачи порошка в зону горения. Этот эффект можно объяснить возрастанием скорости частиц порошка при интенсификации подачи его в зону горения и, следовательно, уменьшением эффективности тушения пожара по причине сокращения времени теплообмена и гетерогенного ингибирования частицами порошка активных центров пламени. Снижение эффективности тушения пожара ведет к росту времени тушения и, соответственно, возрастанию удельного расхода огнетушащего порошка.

Зависимость эффективности тушения пламени от длины взаимодействия (времени взаимодействия  $t_{int}$ ) активных центров пламени с частицами огнетушащего порошка подтверждается результатами экспериментальной работы [16], в которой наблюдалось более быстрое тушение пламени горючей жидкости огнетушащим порошком, когда струя порошка направлялась в зону горения под углом к нормали поверхности горения.

**Заключение.** Получены теоретические зависимости количества тепла, поглощаемого частицами огнетушащего порошка, и скорости реакции гетерогенного ингибирования ими (частицами) активных центров пламени в нестационарных условиях теплопередачи и протекания реакции ингибирования для струйных систем порошкового пожаротушения.

Проведена оценка эффективности механизмов теплового тушения пожара и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в данных условиях.

Установлено, что эффективность как теплового механизма тушения пожара, так и гетерогенного ингибирования активных центров пламени частицами огнетушащего порошка в нестационарном режиме их реализации зависит от дисперсных характеристик частиц порошка, соотношения времени пребывания их в зоне горения и характерных длительностей теплопереноса и реакции ингибирования.

Тушение пламени огнетушащим порошком в нестационарных условиях происходит тем эффективнее, чем меньше эффективный размер частиц порошка, чем больше время пребывания их в зоне горения и чем меньше характерные длительности теплопередачи и реакции ингибирования.

Сопоставление проведенных оценок характерных длительностей теплопереноса и реакции ингибирования для широко применяемых в настоящее время огнетушащих порошков показало большую инерционность теплового механизма тушения пожара, что сильно снижает его эффективность при больших скоростях частиц порошка в зоне горения.

#### Список использованных источников

1. Баратов, А. Н. Горение – Пожар – Взрыв – Безопасность. – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2003. – 364 с.
2. Абдурагимов, И. М. О механизме огнетушащего действия средств пожаротушения / И. М. Абдурагимов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, №4. – С. 60–82.
3. Баратов, А. Н., Огнетушащие порошковые составы / А. Н. Баратов, Л. П. Вогман. – М.: Стройиздат, 1982. – 72 с.
4. Краснянский, М. Е. Порошковая пожаровзрывозащита / М. Е. Краснянский. – Донецк: Общество книголюбов, 1994. – 152 с.
5. Ингибирование пламени метана взвесями солей / А. Н. Баратов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1976. – Т. 12, №1. – С. 72–75.
6. Губин, Е. И. Ингибирование газовых пламен порошковыми составами / Е. И. Губин, И. Г. Дик, А. Ю. Крайнов // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25, №2. – С. 57–62.
7. Крайнов, А. Ю. О пределах распространения пламени по запыленному газу / А. Ю. Крайнов, В. А. Шаурман // Физика горения и взрыва. – 1997. – Т. 33, №4. – С. 14–20.
8. Корольченко, Д. А. Тушение пламени огнетушащим порошком и аэрозольными составами / Д. А. Корольченко, А. Ф. Шароварников // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, №8. – С. 63–68.
9. Сабинин, О. Ю. Экспериментальное изучение влияния технологических свойств порошковых составов на их огнетушащую способность при импульсном способе пожаротушения / О. Ю. Сабинин // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, №6. – С. 64–73.
10. Кицак, А. И. Модель теплового механизма тушения пожара подкласса А1 огнетушащим порошком общего назначения в условиях нестационарного теплообмена / А. И. Кицак // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10, №4. – С. 391–401. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401>
11. Баратов, А. Н. Пожаротушение на предприятиях химической и нефтехимической промышленности / А. Н. Баратов, Е. Н. Иванов. – 2-е изд. перераб. – М.: Химия, 1979. – 368 с.
12. Kreith, F. Basic Heat Transfer / F. Kreith, W. Z. Blac. – Harper and Row, 1980. – 512 p.
13. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
14. Семенов, Н. Н. Цепные реакции / Н. Н. Семенов. – М.: Наука, 1986. – 535 с.
15. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М.: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.
16. Баланюк, В. М. Определение эффективности тушения огнетушащим аэрозолем горючей жидкости на открытом пространстве / В. М. Баланюк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – Т. 5, №10. – С. 4–10.

## References

1. Baratov A. N. *Combustion – Fire – Explosion – Safety*. Moscow, Federal State-Financed Establishment “All-Russian Research Institute for Fire Protection of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”, 2003. 364 p. (in Russian).
2. Abduragimov I. M. About the mechanism of fire extinguishing action of fire extinguishing means. *Pozharovzryvobezopasnost’ = Fire and Explosion Safety*, 2012, vol. 21, no. 4, pp. 60–82 (in Russian).
3. Baratov A. N., Vogman L. P. *Fire Extinguishing Powder Formulations*. Moscow, Stroyizdat Publ., 1982. 72 p. (in Russian).
4. Krasnyanskii M. E. *Powder Fire and Explosion Protection*. Doneck, Society of Book Lovers, 1994. 152 p. (in Russian).
5. Baratov A. N., Vogman L. P., Kobzar’ V. N., Azatyan V. V., Museridze M. D., Dzoceniidze Z. G., Petviashvili D. I., Namoradze M. A. Inhibition of methane flame by salt suspensions. *Fizika gorennya i vzryva = Physics of Combustion and Explosion*, 1976, vol. 12, no. 1, pp. 72–75 (in Russian).
6. Gubin E. I., Dik I. G., Krainov A. Y. Inhibition of gas flames by powder formulations. *Fizika gorennya i vzryva = Physics of Combustion and Explosion*, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 57–62 (in Russian).
7. Krainov A. Y., Sheurman V. A. On the extent of flame propagation through dusty gas. *Fizika gorennya i vzryva = Physics of Combustion and Explosion*, 1997, vol. 33, no. 4, pp. 14–20 (in Russian).
8. Korol’chenko D. A., Sharovarnikov A. F. Extinguishing of a flame by dry chemical powder and aerosol compositions. *Pozharovzryvobezopasnost’ = Fire and Explosion Safety*, 2014, no. 8, pp. 63–68 (in Russian).
9. Sabinin O. Y. The experimental study of the effect of technological properties of powder compositions on their fire extinguishing ability in the pulse method of fire extinguishing. *Pozharovzryvobezopasnost’ = Fire and Explosion Safety*, 2008, vol. 17, no. 6, pp. 64–73 (in Russian).
10. Kitsak A. I. Model of a thermal mechanism for extinguishing a fire of subclass A1 with general purpose fire extinguishing powder under conditions of non stationary heat exchange. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 391–401 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2019-10-4-391-401>
11. Baratov A. N., Ivanov E. N. *Fire Fighting in the Chemical and Petrochemical Industry*. Moscow, Khimiya Publ., 1979. 368 p. (in Russian).
12. Kreith F., Blac W. Z. *Basic Heat Transfer*. Harper and Row, 1980. 512 p.
13. Frank-Kameneckii D. A. *Diffusion and heat transfer in chemical kinetics*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 502 p. (in Russian).
14. Semenov N. N. *Chain Reaction*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 535 p. (in Russian).
15. Kasatkin A. G. *Basic Processes and Devices of Chemical Technology*. Moscow, Publ. House “Alliance” Ltd., 2004. 753 p. (in Russian).
16. Balanyk V. M. Determination of the effectiveness of extinguishing a flammable liquid with a fire extinguishing aerosol in an open space. *Vostochno-Evropeiskii zhurnal peredovykh tekhnologii = Eastern European Journal of Advanced Technologies*, 2015, vol. 5, no. 10, pp. 4–10 (in Russian).

## Информация об авторе

Кицак Анатолий Ильич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник отдела исследований автоматических средств обнаружения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (ул. Солтыса, 183а, 220046, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-7116-8156>. E-mail: kitsak48@yandex.ru.

## Information about the author

Anatoli I. Kitsak – Ph. D. (Physic and Mathematic), Leading Researcher of the Research Department of Automatic Means of Detection and Elimination of Emergencies, Research Institute of Fire Safety and Emergency Situations of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (183a, Soltys Str., 220046, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-7116-8156>. E-mail: kitsak48@yandex.ru

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING**

УДК 531.7  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-487-495>

Поступила в редакцию 04.05.2020  
Received 04.05.2020

**О. В. Мацулевич<sup>1</sup>, А. П. Крень<sup>1</sup>, Т. А. Протасеня<sup>1</sup>, М. Н. Делендик<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Филиал БНТУ «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала», Минск, Республика Беларусь*

**ОЦЕНКА ПОГРЕШНОСТИ КОСВЕННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ДИНАМИЧЕСКОГО  
ИНДЕНТИРОВАНИЯ**

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы метрологического обеспечения при измерении физико-механических характеристик конструкционных материалов методом динамического индентирования. Показано, что оценка погрешности измерений с помощью мер является неэффективной по причине большого разнообразия контролируемых материалов и широкого диапазона изменения их свойств. Разработана методика оценки точности измерений на основании погрешностей отдельных составляющих, которые входят в расчетную формулу, то есть путем определения погрешности косвенных измерений. В основе методики лежит оценка границ случайной погрешности измеряемых характеристик материала и неисключенных систематических погрешностей параметров, по которым рассчитываются искомые характеристики. Приведены результаты экспериментальных исследований, свидетельствующие о том, что в связи с различным характером зависимостей твердости и модуля упругости от регистрируемых параметров индентирования погрешность измерения модуля упругости превышает погрешность измерения твердости. Кроме того, установлено, что погрешность измерения характеристик материалов методом динамического индентирования превышает погрешность измерения методом статического индентирования и может быть уменьшена путем использования более точного оборудования для регистрации процесса испытательного удара. Полученные значения физико-механических характеристик материалов и погрешности их измерения свидетельствуют о том, что метод динамического индентирования позволяет эффективно решать задачу неразрушающего контроля твердости, модуля упругости и коэффициента деформационного упрочнения металлических конструкций и изделий с заданной погрешностью.

**Ключевые слова:** динамическое индентирование, погрешность измерения, косвенные измерения, твердость, модуль упругости.

**Для цитирования:** Оценка погрешности косвенных измерений физико-механических характеристик материалов методом динамического индентирования / О. В. Мацулевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 487–495. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-487-495>

**Oleg V. Matsulevich<sup>1</sup>, Alexander P. Kren<sup>1</sup>, Tatsiana A. Pratasenia<sup>1</sup>, Mikhail N. Delendik<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*Branch of the BNTU “Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development”, Minsk, Republic of Belarus*

**EVALUATION OF THE ERROR OF INDIRECT MEASUREMENTS OF PHYSICAL-MECHANICAL  
CHARACTERISTICS OF MATERIALS BY DYNAMIC INDENTATION METHOD**

**Abstract.** The metrological problems of measuring the physic and mechanical characteristics of materials by dynamic indentation are considered. It is shown that the estimation of measurement error demanding the creation of the reference blocks is ineffective due to the wide variety of controlled materials and a wide range of changes in their properties. A technique has been developed for evaluating the accuracy of measurements based on the errors of individual parameters included

in the calculation equation, i.e. by determining the error of indirect measurements. The technique is based on the estimation of the boundaries of the random error of the measured characteristics of the material and the non-excluded systematic errors of the parameters that are used for the calculations of needed characteristics. The results of experimental studies are presented, indicating that due to the different character of the dependencies of hardness and elastic modulus, the error in measuring the elastic modulus exceeds the error in measuring hardness. In addition, it was found that the error in measuring the characteristics of materials by the dynamic indentation method exceeds the measurement error by the static indentation method and can be reduced by increasing the accuracy of the equipment used for the registration of impact process. The obtained values of the physic and mechanical characteristics of the materials and the values of the measurement error show that the dynamic indentation method can effectively solve the problem of non-destructive testing of hardness, elastic modulus, and strain hardening exponent of metals and products with an appropriate error.

**Keywords:** dynamic indentation, measurement error, indirect measurements, hardness, elastic modulus

**For citation:** Matsulevich O. V., Kren A. P., Pratasenia T. A., Delendik M. N. Evaluation of the error of indirect measurements of physical-mechanical characteristics of materials by dynamic indentation method. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 487–495 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-487-495>

**Введение.** Достоверный контроль физико-механических характеристик конструкционных материалов имеет большое значение, поскольку является основой для безопасной эксплуатации готовых изделий. Уже на предварительных стадиях проектирования происходит выбор материала с определенным набором свойств, которые позволят реализовать необходимые производственные циклы и при этом обеспечат наилучшие характеристики выпускаемой продукции. Кроме того, любая конструкция предполагает проведение ее расчета на прочность, жесткость, устойчивость, а также оценку остаточного ресурса, что возможно исключительно на основании достоверных данных о свойствах конструкционных материалов.

Современные задачи контроля наиболее значимых физико-механических характеристик конструкционных материалов, таких как твердость, модуль упругости, предел прочности, коэффициент деформационного упрочнения, параметры релаксации, ползучести и т. д., решаются в основном разрушающими методами (ГОСТ 1497-84 «Металлы. Методы испытаний на растяжение»; ГОСТ 25.503-97 «Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие»; ГОСТ 3248-81 «Металлы. Метод испытания на ползучесть»). Реализация испытаний с использованием указанных методов требует наличия дорогостоящего лабораторного оборудования. Кроме того, разрушающие методы предполагают изготовление специальных образцов, что практически исключает возможность контроля готовых изделий ответственного назначения.

Этих недостатков лишен интенсивно развиваемый в настоящее время метод динамического индентирования (МДИ). Метод сочетает высокую информативность и достоверность инструментального индентирования (ГОСТ Р 8.748-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений. Металлы и сплавы. Измерение твердости и других характеристик материалов при инструментальном индентировании. Часть 1. Метод испытаний»; СТБ 2495-2017 «Контроль неразрушающий. Определение физико-механических характеристик конструкционных материалов методами индентирования») с неразрушающим характером испытаний, обусловленным возможностью контроля изделий сложной формы без необходимости изготовления из них специальных образцов [1, 2]. Современная портативная измерительная аппаратура [3], реализующая данный метод, обеспечивает проведение сплошного оперативного контроля не только материалов на стадии производства, но и готовых изделий в процессе их технического обслуживания. Однако наряду со всеми преимуществами МДИ существует ряд сложностей с его метрологическим обеспечением.

**Цель и задачи исследования.** Метрологическая аттестация приборов, реализующих МДИ, предполагает наличие эталонных образцов измеряемых характеристик. Но в настоящее время для этой цели могут использоваться только стандартизованные меры твердости (по шкалам Бринелля *HB*, Роквелла *HRC* и Виккерса *HV*), причем с рядом ограничений по диапазону измерения и контролируемым материалам. Эталонная база для измерения других физико-механических характеристик полностью отсутствует. Это связано с тем, что изготовление и аттестация мер или стандартных образцов нецелесообразны по причине большого разнообразия контролируемых материалов и, соответственно, широкого диапазона изменения их свойств.

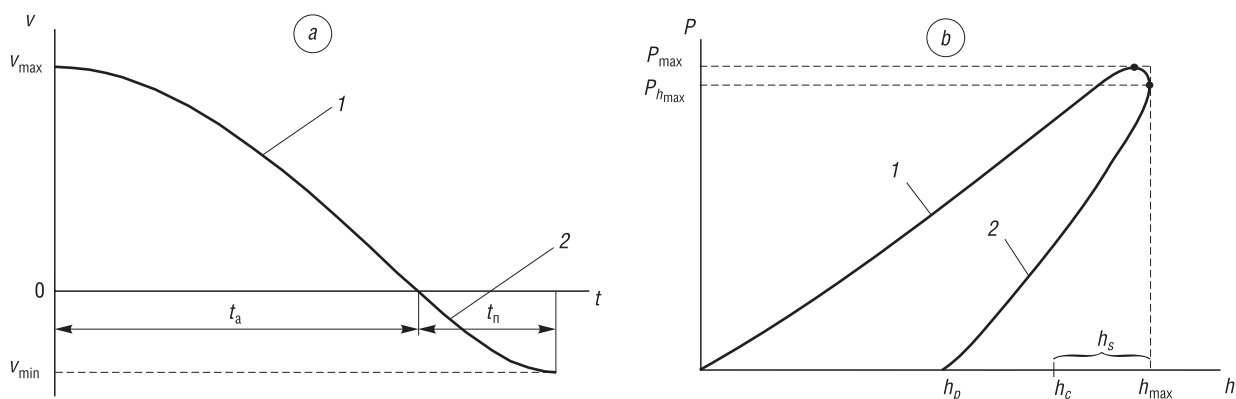


В то же время, имея аналитические зависимости для расчета свойств материала по параметрам индентирования, оценку точности измерений и, соответственно, подтверждение метрологических характеристик средств измерений можно проводить на основе погрешности определения отдельных составляющих, входящих в расчетную формулу, то есть на основании косвенных измерений [4].

Рассмотрим возможность применения данного подхода на примере измерения методом динамического индентирования твердости, модуля упругости и коэффициента деформационного упрочнения.

**Методика определения физико-механических характеристик и применяемое оборудование.** МДИ заключается в ударном вдавливании в испытуемый материал жесткого индентора и непрерывной регистрации параметров его движения (перемещения, скорости или ускорения). Эти параметры не являются независимыми величинами и связаны между собой. Например, если аппаратура, реализующая метод, использует датчик регистрации текущей скорости движения индентора  $v(t)$ , то значения перемещения  $h(t)$  могут быть получены путем интегрирования скорости, а значения контактной силы  $P(t)$  – дифференцирования скорости и последующего умножения на массу индентора  $M$ .

Исходными данными для расчетов при динамическом индентировании являются зависимость  $v(t)$  (рисунок, *a*) и диаграмма ударного нагружения  $P(h)$  (рисунок, *b*), описывающие активный и пассивный этапы удара продолжительностью  $t_a$  и  $t_n$  соответственно. На основании параметров индентирования, определяемых по кривым  $v(t)$  и  $P(h)$ , может быть установлен ряд характеристик испытуемого материала, в том числе динамическая твердость  $H_D$ , модуль упругости  $E_D$  и коэффициент деформационного упрочнения  $\xi$ .



Типичный вид изменения текущей скорости индентора в процессе удара (*a*) и диаграммы динамического нагружения (*b*): 1 – активный этап удара, 2 – пассивный этап удара

A typical view of changes of the current velocity of the indenter during the impact process (*a*) and the dynamic loading diagram (*b*): 1 – active stage of impact, 2 – passive stage of impact

Динамическую твердость  $H_D$  определяют как отношение контактной силы  $P_{h_{max}}$ , соответствующей максимальной глубине внедрения  $h_{max}$ , к площади поперечного сечения  $A_c$  контактной поверхности (отпечатка) между индентором и испытуемым образцом (СТБ 2495-2017).

$$H_D = \frac{P_{h_{max}}}{A_c}, \tag{1}$$

где  $A_c = \pi d_c^2 / 4$ ,  $d_c$  – диаметр контактного отпечатка.

Значение  $d_c$  для сферического индентора диаметром  $D$  с достаточной для практики точностью рассчитывается с помощью выражения [3]

$$d_c = 2\sqrt{Dh_c}, \tag{2}$$

где  $h_c$  – контактная глубина внедрения.

Используя положения [5, 6], можно записать

$$h_c = h_{\max} - h_s = 0,5(h_{\max} + h_p), \quad (3)$$

где  $h_{\max}$  – максимальная глубина внедрения,  $h_s$  – упругий прогиб контура отпечатка,  $h_p$  – пластическая составляющая общей глубины внедрения, равная глубине отпечатка, остающегося на поверхности материала.

Таким образом, формулу для вычисления твердости  $H_D$  через параметры, которые регистрируются при динамическом индентировании, можно записать в следующем виде:

$$H_D = \frac{2P_{h_{\max}}}{\pi D(h_{\max} + h_p)}. \quad (4)$$

Динамический модуль упругости определяют на основании значения приведенного динамического модуля упругости  $E_{rd}$  испытываемого материала и материала индентора, рассчитываемого по формуле (СТБ 2495-2017)

$$E_{rd} = \frac{6}{5} \frac{P_{h_{\max}}^2}{Mv_{\max}^2 e^2 d_c}. \quad (5)$$

Подставляя в формулу (5) выражения (2) и (3) и учитывая, что коэффициент восстановления скорости  $e$  равен отношению скорости отскока индентора  $v_{\min}$  к предупредительной скорости  $v_{\max}$ , можно получить

$$E_{rd} = \frac{3\sqrt{2}}{5} \frac{P_{h_{\max}}^2}{Mv_{\min}^2 \sqrt{D(h_{\max} + h_p)}}. \quad (6)$$

Динамический модуль упругости испытываемого материала  $E_D$  рассчитывают по формуле

$$E_D = \frac{1 - \mu_m^2}{\frac{1}{E_{rd}} - \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}}, \quad (7)$$

где  $\mu_m$  и  $\mu_i$  – коэффициенты Пуассона испытываемого материала и материала индентора соответственно,  $E_i$  – модуль упругости материала индентора.

Коэффициент деформационного упрочнения  $\xi$  устанавливают на основе известного выражения Мейера [3]

$$P_{\max} = ad_c^\gamma, \quad (8)$$

где  $a$  – коэффициент, зависящий от диаметра индентора и физико-механических характеристик испытываемого материала;  $\gamma = \xi + 2$  – индекс Мейера.

Методика определения индекса  $\gamma$ , на основании которого можно рассчитать коэффициент  $\xi$ , описана в [3] и заключается в испытаниях образцов методом динамического индентирования при различной величине предупредительной скорости индентора и расчете по формуле

$$\gamma = \frac{\Delta \ln(P_{\max})}{\Delta \ln(d_c)}, \quad (9)$$

где  $\Delta \ln(P_{\max})$  и  $\Delta \ln(d_c)$  – изменения значений соответственно  $\ln(P_{\max})$  и  $\ln(d_c)$ , вызванные увеличением предупредительной скорости индентора.

Для проведения экспериментальных исследований нами использовался программно-аппаратный комплекс ИСУМ-1 [7], разработанный в рамках научно-технической программы Союзного государства «Мониторинг-СТ» и внесенный в Государственный реестр средств измерений Республики Беларусь. Прибор ИСУМ-1 реализует МДИ посредством магнитоиндукционного датчика с гравитационным разгоном индентора и обеспечивает прямое измерение скорости отскока индентора, контактной силы и глубины внедрения. Конструкция индентора позволяет проводить испытания широкого класса материалов, в том числе металлов с твердостью до

70 HRC. Масса индентора составляет 4,3 г, предударная скорость – 0,8–0,9 м/с. Наконечник индентора изготовлен из карбида вольфрама ( $\mu_i = 0,24$ ,  $E_i = 7,1 \cdot 10^{11}$  Па) и имеет сферическую форму с диаметром 2,3 мм.

Определение характеристик материалов проводилось на образцах, изготовленных из алюминиевого сплава ( $\mu_m = 0,34$ , твердость 81 HB), латуни ( $\mu_m = 0,35$ , твердость 132 HB) и стали ( $\mu_m = 0,28$ , твердость 105 HB и 27,1 HRC). Шероховатость испытуемой поверхности для всех образцов составила не более Ra 0,8.

**Методика расчета погрешности и результаты измерений.** Порядок определения результата и погрешности косвенных измерений устанавливает МИ 2083-90 «Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей». Согласно этому документу, значение искомой величины рассчитывается на основании средних значений аргументов (параметров, входящих в расчетные формулы). Соответственно, случайная погрешность искомой величины определяется исходя из средних квадратических отклонений аргументов. Однако такой подход допускается только в случае воспроизводимых измерений. В то же время при проведении испытаний методами индентирования измерения необходимо выполнять в различных местах образца, чтобы остающиеся отпечатки не оказывали влияния на последующие измерения. Поскольку образцы всегда имеют определенный разброс физико-механических характеристик, связанный с неоднородностью структуры металла, то измерения являются невоспроизводимыми. Поэтому значения характеристик, устанавливаемых методом динамического индентирования, следует рассчитывать для каждого наблюдения с последующим усреднением. Границы случайной погрешности результата измерения искомой величины  $Y$  в этом случае определяют по следующей формуле:

$$\varepsilon_Y = t_{P,n} S(\tilde{Y}), \quad (10)$$

где  $Y$  – измеряемая характеристика материала;  $t_{P,n}$  – коэффициент Стьюдента, при доверительной вероятности  $P = 0,95$  и количестве измерений  $n = 10$  принимаемый равным 2,26 для всех искомых величин;  $S(\tilde{Y})$  – среднее квадратическое отклонение результата измерения.

Величина  $S(\tilde{Y})$  рассчитывается согласно выражению

$$S(\tilde{Y}) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n(n-1)}}, \quad (11)$$

где  $Y_i$  – результаты вычислений искомой величины по отдельным измерениям;  $\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i / n$  – среднее значение искомой величины.

Границы неисключенной систематической погрешности (НСП) результата измерения искомой величины  $Y$  будем определять согласно МИ 2083-90 по формуле

$$\Theta_Y = k \sqrt{\sum_{i=1}^m \left( \frac{\partial Y}{\partial z_i} \right)^2} \Theta_{z_i}, \quad (12)$$

где  $z_i$  – аргументы, входящие в формулу для расчета искомой характеристики материала;  $\Theta_{z_i}$  – границы НСП аргументов;  $\partial Y / \partial z_i$  – частные производные функции искомой величины по соответствующим аргументам;  $m$  – количество аргументов;  $k$  – поправочный коэффициент, принимаемый равным 1,1 при доверительной вероятности  $P = 0,95$ .

Рассмотрим, как определяются границы НСП всех параметров, входящих в формулы (3), (6), (7) и (9).

Физико-механические характеристики материала индентора  $\mu_i$  и  $E_i$ , а также коэффициент Пуассона испытуемого материала  $\mu_m$  являются справочными данными. Значения диаметра  $D$  и массы  $M$  индентора измерялись с помощью оптического профилометра MicroXAM 800 (KLA-Tencor Corporation, Германия) и прецизионных весов Ohaus RV313 (Ohaus, США) соответственно. НСП параметров  $D$  и  $m$  принималась равной основной допускаемой погрешности использованных средств измерений и составила:  $\Theta_D = 0,1\%$ ,  $\Theta_m = 1 \cdot 10^{-6}$  кг, что в процентном выражении относительно измеренного значения массы индентора составило 0,2 %.

Погрешность измерения скорости индентора определялась по методике, приведенной в СТБ 2495-2017, путем сбрасывания индентора с известной высоты  $L$  и сравнения значения предупредной скорости индентора  $v_{\max}$ , отображаемой прибором, со значением скорости  $v_{\max}^p$ , рассчитанным по формуле  $v_{\max}^p = \sqrt{2gL}$  ( $g$  – ускорение свободного падения, принимаемое равным  $9,81 \text{ м/с}^2$ ). В силу одинакового способа регистрации предупредной скорости  $v_{\max}$  и скорости отскока  $v_{\min}$  погрешности их измерения принимались одинаковыми. Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что относительная погрешность измерения предупредной скорости не превышает 1 %. Это значение принималось в качестве наибольшей допустимой погрешности скорости индентора, соответственно НСП параметра  $v_{\min}$  рассчитывалась по формуле

$$\Theta_{v_{\min}} = 0,01 \cdot \bar{v}_{\min}, \quad (13)$$

где  $\bar{v}_{\min}$  – среднее значение скорости отскока индентора в серии.

Погрешность измерения глубины внедрения определялась путем измерения профиля отпечатка с помощью оптического профилометра MicroХАМ 800 и сравнения полученной глубины отпечатка с показаниями прибора  $h_p$ . Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что относительная погрешность измерения величины  $h_p$  не превышает 4 %. В силу одинакового способа измерения различных составляющих глубины внедрения полученную относительную погрешность можно принять равной для  $h_{\max}$  и  $h_p$ . НСП данных параметров при определении физико-механических материалов устанавливалась согласно выражениям:

$$\Theta_{h_p} = 0,04 \cdot \bar{h}_p, \quad (14)$$

$$\Theta_{h_{\max}} = 0,04 \cdot \bar{h}_{\max}, \quad (15)$$

где  $\bar{h}_p, \bar{h}_{\max}$  – средние значения параметров  $h_{\max}$  и  $h_p$  в серии.

Как уже отмечалось ранее, измеренные значения контактной силы  $P$  и глубины внедрения  $h$  определяются путем дифференцирования:  $P = Mdv/dt$ , и интегрирования:  $h = \int V(t)dt = dt \cdot \sum V_i$ , зависимости текущей скорости индентора  $v$  от времени  $t$  соответственно. Исходя из СТБ 2495-2017 относительную погрешность измерения контактной силы в этом случае допускается определять на основании относительной погрешности измерения глубины внедрения по формуле  $\Delta P/P = \Delta h/h + \Delta M/M$ . Поскольку погрешность глубины внедрения, принятая равной 4 %, значительно превышает погрешность массы индентора (0,2 %), величиной  $\Delta M/M$  можно пренебречь. Таким образом, НСП параметра  $P_{h_{\max}}$  можно определять аналогично  $h_{\max}$ :

$$\Theta_{P_{h_{\max}}} = 0,04 \cdot \bar{P}_{h_{\max}}. \quad (16)$$

В соответствии с МИ 2083-90 погрешность результата косвенного измерения  $\Delta_Y$  искомой величины  $Y$  определяется в зависимости от соотношения  $\Theta_Y/S_Y$  между НСП искомой величины и ее средним квадратическим отклонением. Если  $\Theta_Y/S_Y$  находится в диапазоне от 0,8 до 8, что справедливо для всех испытанных образцов, то  $\Delta_Y$  вычисляется по формуле

$$\Delta_Y = K(\varepsilon_Y + \Theta_Y), \quad (17)$$

Т а б л и ц а 1. Результаты измерения динамической твердости образцов

Table 1. Results of measuring the dynamic hardness of samples

Материал	$\bar{H}_D$ , МПа	$\Theta_{H_D}$ , МПа	$\Theta_{H_D}$ , %	$S_{H_D}$ , МПа	$\varepsilon_{H_D}$ , МПа	$\varepsilon_{H_D}$ , %	$\Delta_{H_D}$ , МПа	$\Delta_{H_D}$ , %
Алюминий 81 HB	684,3	36,9	5,4	9,1	20,6	3,0	43,7	6,4
Латунь 132 HB	1455,2	78,8	5,4	27,8	62,9	4,3	101,3	7,0
Сталь 105 HB	1551,6	83,8	5,4	25,6	57,9	3,7	103,4	6,7
Сталь 27,1 HRC	3119,7	169,9	5,5	51,2	115,7	3,7	208,6	6,7

где  $K$  – коэффициент, определяемый в зависимости от принятой доверительной вероятности и отношения  $\Theta_Y/S_Y$ .

В табл. 1–3 приведены средние по 10 измерениям значения твердости, модуля упругости и индекса Мейера испытанных образцов, рассчитанные по формулам (4), (7) и (9), а также погрешности измерения данных характеристик.

**Обсуждение результатов и выводы.** Результаты проведенных исследований показали, что погрешность измерения модуля упругости методом динамического инден-

Т а б л и ц а 2. Результаты измерения модуля упругости образцов

Table 2. Results of measuring the elastic modulus of samples

Материал	$\bar{E}_D$ , ГПа	$\Theta_{E_D}$ , ГПа	$\Theta_{E_D}$ , %	$S_{E_D}$ , ГПа	$\varepsilon_{E_D}$ , ГПа	$\varepsilon_{E_D}$ , %	$\Delta_{E_D}$ , ГПа	$\Delta_{E_D}$ , %
Алюминий 81 HB	71,4	7,3	10,2	0,9	2,0	2,8	7,4	10,4
Латунь 132 HB	101,8	10,8	10,6	1,9	4,2	4,2	11,4	11,3
Сталь 105 HB	213,7	25,7	12,0	2,9	6,6	3,1	24,6	11,5
Сталь 27,1 HRC	214,9	25,9	12,1	3,5	7,9	3,7	25,7	12,0

Т а б л и ц а 3. Результаты измерения индекса Мейера

Table 3. Results of measuring the Meyer index

Материал	$\gamma$	$\Theta_\gamma$	$\Theta_\gamma$ , %	$S_\gamma$	$\varepsilon_\gamma$	$\varepsilon_\gamma$ , %	$\Delta_\gamma$	$\Delta_\gamma$ , %
Алюминий 81 HB	2,057	0,081	3,9	0,035	0,08	3,8	0,121	5,9
Латунь 132 HB	2,1	0,101	4,8	0,043	0,1	4,7	0,151	7,2
Сталь 105 HB	2,139	0,136	6,4	0,067	0,152	7,1	0,219	10,2
Сталь 27,1 HRC	2,221	0,145	6,5	0,06	0,135	6,1	0,212	9,6

тирования (см. табл. 2), незначительно изменяющаяся для различных материалов и составляющая в среднем 11,3 %, превышает погрешность измерения твердости (в среднем 6,7 %) (см. табл. 1). Это обусловлено разницей в НСП измерения данных характеристик, поскольку случайные погрешности измерения твердости  $\varepsilon_{HD}$  и модуля  $\varepsilon_{ED}$  практически одинаковы (в среднем 3,7 и 3,5 % соответственно). Более высокие значения  $\Theta_{ED}$  (в среднем 11,2 %) по сравнению с  $\Theta_{HD}$  (в среднем 5,4 %) объясняются характером зависимостей твердости и модуля упругости от регистрируемых параметров индентирования, в частности квадратичной зависимостью  $E_D$  от контактной силы  $P_{h_{max}}$ . Погрешность измерения индекса  $\gamma$ , на основании которого можно рассчитать коэффициент деформационного упрочнения, составила для различных материалов от 5,9 до 10,2 %.

Сравнивая полученные результаты с результатами измерения характеристик материалов методом статического индентирования, приведенными в [8], можно сделать вывод, что общая погрешность измерения при использовании метода динамического индентирования имеет более высокие значения. Например, погрешности измерения динамической твердости  $\Delta_{HD}$  и статической  $\Delta_{HT}$  составляют в среднем соответственно 6,8 и 2,2 %, погрешности измерения динамического модуля упругости  $\Delta_{ED}$  и статического  $\Delta_{ET}$  – 10,2 и 3,9 %, Это обусловлено прежде всего сложностью высокоточной регистрации процесса испытательного удара, продолжительность которого при испытаниях металлов равна 20–50 мкс. Инструментальные погрешности датчиков, применяемых для измерения глубины внедрения и контактной силы при статическом индентировании, составляют соответственно 0,15–0,5 и 1 % [8], при динамическом индентировании – 4 %. Таким образом, основным направлением снижения погрешности измерения физико-механических характеристик материалов при использовании МДИ является повышение точности используемого оборудования.

В то же время необходимо отметить, что полученные значения погрешности измерения физико-механических характеристик методом динамического индентирования являются вполне приемлемыми для использования реализующих данный метод приборов в качестве рабочих средств измерений. Применение разработанных приборов позволит значительно расширить номенклатуру изделий, для которых необходимо осуществлять неразрушающий контроль таких характеристик, как модуль упругости и коэффициент деформационного упрочнения. При этом результаты измерения модуля упругости испытанных образцов (71,4 ГПа для алюминия, 101,8 ГПа для латуни, 213,7 и 214,9 ГПа для стали) хорошо согласуются со справочными данными для использованных материалов (70 ГПа, 100 и 210 ГПа соответственно).

### Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T20УКА-002).

### Acknowledgements

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. T20УКА-002).

### Список использованных источников

1. Extraction of mechanical properties of materials through deep learning from instrumented indentation / Ming Dao Lu Lu [et al.] // PNAS, Proc. Natl. Acad. Sci. USA. – 2020. – Vol. 117, № 13. – P. 7052–7062. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922210117>
2. Gao, Chenghui. Instrumented indentation of fused silica by Berkovich indenter / Chenghui Gao, Ming Liu // J. Non-Cryst. Solids. – Vol. 475, № 1. – P. 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.09.006>
3. Kren, A. P. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation / A. P. Kren, V. A. Rudnitskii // Russian Metallurgy (Metally). – 2019. – Vol. 2019, № 4. – P. 478–483. <https://doi.org/10.1134/S0036029519040220>
4. Rabinovich, S. G. Evaluating Measurement Accuracy: A Practical Approach / S. G. Rabinovich. – New York: Springer-Verlag, 2010. – 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1456-9>
5. Oliver, W. C. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments / W. C. Oliver, G. M. Pharr // J. Mater. Res. – 1992. – Vol. 7, iss. 6. – P. 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
6. Fischer-Cripps, A. C. Critical review of claims for ultra-hardness in nanocomposite coatings / A. C. Fischer-Cripps, S. J. Bull, N. Schwarzer // Philos. Mag. – 2012. – Vol. 92, № 13. – P. 1601–1630. <https://doi.org/10.1080/14786435.2011.652688>
7. Применение метода ударного микроиндентирования для оценки механических характеристик и дефектности структуры углеродных композиционных материалов / А. П. Крень [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 4. – С. 469–477. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-469-477>
8. Крень, А. П. Оценка погрешности определения физико-механических характеристик материалов при их контроле методом индентирования / А. П. Крень, О. В. Мацулевич, М. Н. Делендик // Приборы и методы измерений. – 2018. – Т. 9, № 3. – С. 263–271. <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-263-271>

### References

1. Lu Lu Ming Dao, Punit Kumar, Upadrasta Ramamurty, George Em Karniadakis, Subra Suresh. Extraction of mechanical properties of materials through deep learning from instrumented indentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2020, vol. 117, no. 13, pp. 7052–7062. <https://doi.org/10.1073/pnas.1922210117>
2. Chenghui Gao, Ming Liu. Instrumented indentation of fused silica by Berkovich indenter. *Journal of Non-Crystalline Solids*, vol. 475, no. 1, pp. 151–160. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2017.09.006>
3. Kren A. P., Rudnitskii V. A. Determination of the Strain-Hardening Exponent of a Metallic Material by Low-Speed Impact Indentation. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2019, no. 4, pp. 478–483. <https://doi.org/10.1134/S0036029519040220>
4. Rabinovich S. G. *Evaluating Measurement Accuracy: A Practical Approach*. New York, Springer-Verlag, 2010. 272 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-1456-9>
5. Oliver W. C., Pharr G. M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments. *Journal of Materials Research*, 1992, vol. 7, iss. 6, pp. 1564–1583. <https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564>
6. Fischer-Cripps A. C., Bull S. J., Schwarzer N. Critical review of claims for ultra-hardness in nanocomposite coatings. *Philosophical Magazine*, 2012, vol. 92, no. 13, pp. 1601–1630. <https://doi.org/10.1080/14786435.2011.652688>
7. Kren A. P., Delendik M. N., Pratasenya T. A., Kinzhagulov I. Y. Application of the impact microindentation method for estimation of the mechanical characteristics and defects of the structure of carbon materials and products. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 4, pp. 469–477 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-4-469-477>
8. Kren A. P., Matsulevich O. V., Delendik M. N. Error estimation of the physical and mechanical characteristics measurements by indentation. *Pribory i metody izmerenii = Devices and Methods of Measurements*, 2018, vol. 9, no. 3, pp. 263–271 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2220-9506-2018-9-3-263-271>

### Информация об авторах

Мацулевич Олег Владимирович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: matsulevich.o.v@gmail.com

Крень Александр Петрович – доктор технических наук, заведующий лабораторией контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>. E-mail: alekspk@mail.ru

### Information about the authors

Oleg V. Matsulevich – Ph. D (Engineering), Senior Researcher of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: matsulevich.o.v@gmail.com

Alexander P. Kren – D. Sc. (Engineering), Head of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9658-1003>. E-mail: alekspk@mail.ru

*Протасеня Тат'яна Анатольевна* – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории контактно-динамических методов контроля, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 5657397@gmail.com

*Делендик Михаил Николаевич* – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Безопасность технологических процессов и производств», филиал Белорусского национального технического университета «Межотраслевой институт повышения квалификации и переподготовки кадров по менеджменту и развитию персонала» (ул. Минина, 23, корп. 2, 220014, Минск, Республика Беларусь). E-mail: delendik@mipk.by

*Tatsiana A. Pratasenia* – Ph. D (Engineering), Senior Researcher of the Mechanical Testing Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 5657397@gmail.com

*Mikhail N. Delendik* – Ph. D (Engineering), Head of the Chair “Safety of Technological Processes and Manufacture”, Branch of the Belarusian National Technical University “Intersectoral Institute for Staff Training and Retraining on Management and Personnel Development” (23/2, Minin Str., 220014, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: delendik@mipk.by

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**  
**DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS**

УДК 621.311.25:621.039  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-496-505>

Поступила в редакцию 15.04.2020  
Received 15.04.2020

**В. В. Сорокин**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны, Национальной академии наук  
Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПАССИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕКОМБИНАТОРА  
ВОДОРОДА В УСЛОВИЯХ АВАРИИ НА АЭС-2006**

**Аннотация.** Выполнен расчет параметров работы системы удаления водорода в условиях тяжелой аварии на АЭС-2006. Система включает пассивные автокаталитические рекомбинаторы водорода, которые превращают водород в воду в ходе реакции с кислородом воздуха на катализаторе и обеспечивают подвод реагентов и отвод продуктов за счет естественной конвекции. Разработана расчетная модель рекомбинатора с блоком катализатора (основной материал катализатора – платина с долей палладия) в форме пластин. Два свободных параметра модели – скорость реакции на катализаторе и гидравлическое сопротивление – устанавливаются на основе экспериментальных данных. Определены характеристики пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии. Производительность устройства в условиях аварии соответствует заявленной производителем. Температура катализатора, даже средняя по поверхности, выше 500 °С, температура выхлопной струи превышает 150 °С, содержание водорода в выхлопной струе значительно. Производительность рекомбинатора водорода линейно увеличивается с ростом объемного содержания водорода в газовой смеси, поступающей в устройство. Суммарная производительность рекомбинаторов водорода в составе локализующей системы безопасности постоянна в условиях как равномерной, так и неравномерной концентрации водорода под герметичным ограждением. Влияние температуры атмосферы на производительность незначительно. Данные расчетов могут использоваться для оценки работы рекомбинаторов водорода при аварии на АЭС-2006.

**Ключевые слова:** АЭС, ВВЭР, тяжелые аварии, водородная безопасность, локализующая система безопасности, система удаления водорода, каталитические рекомбинаторы, пластинчатые каталитические элементы, производительность, расчеты

**Для цитирования:** Сорокин, В. В. Расчет характеристик пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006 / В. В. Сорокин // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №4. – С. 496–505. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-496-505>

**Vladimir V. Sorokin**

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**PASSIVE AUTOCATALITIC RECOMBINER CHARACTERITICS CALCULATION DURING SEVERE  
ACCIDENT ON AES-2006 NPP**

**Abstract.** A modern NPP is equipped by containment to hold radioactive substances and ionizing radiation bounded as design margins prescribe. Hydrogen mitigation system is used to protect containment against hydrogen fire and detonation. The system includes a scope of passive autocatalytic recombiners. Hydrogen is transformed into water, passing through said recombiners. The reaction occurs on catalyst surface. The main catalyst material is a palladium doped platinum. Hydrogen mitigation system parameters during severe accident are of interest. Wise admitted for NPP full scale tests are impossible, so the main analysis are calculations. Recombiner consists of catalytic block and stuck. The stuck provides reagents feeding and products evacuation enhancing natural convection transport. A model for calculations is suggested for recombinder with a plate-type catalyst block. The two free parameters of the model are chemical reaction intensity on catalyst and unit drag. Said parameters are estimated experimental data based on. Passive autocatalytic recombinder characteritics during severe accident on AES-2006 NPP are calculated. The unit capacity is found not less that specification points. Catalyst temperatures, even the mean one, are above 500 °C, exhaust jet temperature exceeds 150 °C. Hydrogen content is high in the jet. Capacity



increases linearly with hydrogen concentration at the unit entrance. Atmospheric temperature influence is low. Hydrogen mitigation system overall capacity is constant for uniform or not uniform hydrogen distribution in the containment. The calculated data may be used for recombiner work estimation during accident on AES-2006 NPP.

**Keywords:** NPP, WWER, severe accidents, hydrogen mitigation system, containment, passive autocatalytic recombiner, plate-type catalytic elements, capacity, calculations

**For citation:** Sorokin V. V. Passive autocatalytic recombiner characteristics calculation during severe accident on AES-2006 NPP. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 496–505 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-496-505>

**Введение.** На современной атомной электростанции предусмотрена локализирующая система безопасности для удержания при аварии радиоактивных веществ и ионизирующего излучения в установленных проектом границах. Границу системы образует герметичное ограждение (ГО). Для защиты ГО от разрушения и поддержания его работоспособности необходимо решить проблему, связанную с выходом и накоплением водорода под ограждением при тяжелой аварии. Масса водорода может превышать 1 т, а концентрация и объем достаточны для горения или детонации [1]. При поджигании водорода сопутствующие эффекты роста давления и температуры способны разрушить ограждение.

На АЭС-2006 с ВВЭР-1200 по сравнению с другими ВВЭР опасность потенциально выше вследствие большой массы и значительной степени выгорания топлива в активной зоне. В проекте «АЭС-2006» предусматривается система удаления водорода, включающая пассивные автокаталитические рекомбинаторы водорода. Пассивный принцип действия, а также независимость функциональных элементов системы от других систем энергоблока и друг от друга обеспечивают ей высокую степень надежности ([2]; AREVA Passive Autocatalytic Recombiner. AREVA GmbH, 2013. G-008-V3-13-ENGPB). Обоснование водородной безопасности излагается оператором блока АЭС в отчете по обоснованию безопасности (ООБ).

Как правило, при проектной работе рекомбинаторов опасные концентрации водорода не достигаются. При экспертизе ООБ и в ходе проверки перед выдачей лицензии на эксплуатацию возникает вопрос о достоверности соответствия параметров работы системы удаления водорода проектным значениям в условиях тяжелой аварии. Принятые в атомной энергетике полномасштабные экспериментальные и натурные испытания системы в таких условиях невозможны, основная часть анализа приходится на расчетные исследования.

В поддержку расчетных исследований реализуется ряд экспериментальных программ. После аварии на АЭС «Фукусима-1» в марте 2011 г. усилился интерес к изучению рекомбинаторов и процесса сжигания водорода на атомных электростанциях [3]. В Европе подобные исследования активно велись и до этого, например в рамках Severe Accident NETwork (SARNET). Улучшение понимания процессов, происходящих внутри рекомбинатора, остается вызовом для исследователей. Важные экспериментальные данные получены на установке REKO в Юлихском исследовательском центре (Forschungszentrum Jülich GmbH, Германия). REKO-3 представляет серию испытаний отдельных каталитических пластин в условиях вынужденной конвекции. В ходе испытаний определены температуры газа и катализатора при разных составах и скоростях атмосферы для катализаторов четырех типов. REKO-4 представляет испытания в условиях естественной конвекции.

В 2007 г. под руководством Агентства по ядерной энергии (OECD Nuclear Energy Agency) при поддержке семи европейских стран-партнеров, а также Канады и Республики Корея на установке OECD-THAI (Thermal-hydraulics, Hydrogen, Aerosols, Iodine) началось исследование, в рамках которого изучается взаимодействие рекомбинатора с атмосферой большого замкнутого объема в присутствии пара, при нехватке кислорода, при разных абсолютных давлениях, при наличии продуктов деления, включая воздействие на продукты деления.

Продолжается анализ технических аспектов развития аварийного процесса на АЭС «Фукусима-1» [4, 5]. Осуществляется международный проект BSAF (Benchmark Study of the Accidents at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant), действует международная группа экспертов ОЭСР (Senior Expert Group on Safety Research Opportunities post-Fukushima (SAREF)). Ведутся исследования, нацеленные на устранение выявленных проблем водородной безопасности ([6]; Документация по запросу предложений на НИОКР по реализации мероприятий обеспечения

водородной взрывобезопасности и управлению тяжелыми авариями на АЭС с ВВЭР в рамках устранения замечаний Ростехнадзора, см.: <https://zakupki.kontur.ru/31705778561>).

Для оценки водородной безопасности АЭС устанавливается производительность рекомбинатора, определяются его температурные характеристики в предполагаемых условиях аварии. Эти данные, необходимые для анализа безопасности, в литературе обычно не приводятся. *Цель настоящего исследования* заключалась в разработке простой и действенной расчетной модели для определения характеристик пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006.

**Особенности горения и детонации водорода.** Смеси водорода и воздуха воспламеняются в диапазоне концентраций водорода 4–75 об.% и детонируют при 18,3–74 об.% [7]. Энергия зажигания, необходимая для воспламенения, составляет величину  $E = 19 \cdot 10^{-6}$  Дж (для углеводорода  $E = 280 \cdot 10^{-6}$  Дж). Энергия, инициирующая реакцию водорода с кислородом, настолько мала, что воспламенение может произойти даже за счет заряда электростатического электричества, накопившегося на одежде. Подожженный водород горит невидимым спокойным пламенем при температуре 2200 К, пламя распространяется со скоростью 2,7 м/с. Интенсивность теплового излучения водородного пламени почти на порядок меньше, чем при горении углеводородов. Для стехиометрических смесей водорода с воздухом тротиловый эквивалент составляет 10,6 кг на 1 кг  $H_2$  (для метана – 4,8 кг). Детонация водорода, приводящая к разрушению ГО, возможна при минимальной массе водорода 22,8 кг [8].

**Устройство рекомбинатора водорода.** В большинстве стран, в том числе в Беларуси и России, принято и реализуется решение об оснащении действующих и строящихся АЭС системами удаления водорода при авариях ([9]; Техническое задание на закупку системы аварийного удаления водорода из ГО РУ для энергоблоков №3 и №4 Нововоронежской АЭС. Утв. 04.07.2013. Нововоронеж: НВАЭС, 2013. 10 с.). Основу системы составляют рекомбинаторы. Рекомбинатор состоит из корпуса и кассеты. Кассета содержит каталитические элементы, установленные с образованием каналов для прохода газообразной среды. Катализатор наносится в форме покрытия на поверхности элементов. При контакте с катализатором происходит химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением тепла. Возникает устойчивый конвективный поток, который обеспечивает непрерывное поступление газовой смеси к катализатору и отвод пара через перфорацию, выполненную в верхней части корпуса. В результате концентрация водорода в ГО снижается. Рекомбинаторы должны включиться в работу только в случае аварии на блоке АЭС и надежно отработать в ГО от ста до нескольких сотен часов. Состояние ожидания в готовности устройств длится десятки лет. Работоспособность рекомбинаторов в условиях аварий гарантирована их устойчивостью к воздействию высоких температур, агрессивных сред, ударных нагрузок, высоких уровней радиации. Исходя из этого формулируются необходимые требования к системам водородной безопасности: термостабильность, термостойкость, коррозионная и радиационная стойкость, механическая прочность, регенерируемость.

Известны несколько типов катализатора, которые применяются в рекомбинаторах.

**Зернистый катализатор.** В катализаторе, описанном в [10], засыпка алюминиевых таблеток диаметром 4 и 6 мм размещена в кассете размером  $45 \times 20$  см с проницаемой стенкой. Поверхность таблеток покрыта палладием на глубину до 0,5 мм и гидрофобизирована. 88 кассет расположены с образованием щелей шириной 1 см для прохода газа. Также известны зернистый катализатор с частицами из керамики [11]; катализатор, нанесенный на стержни из оксида алюминия диаметром 5,8 мм [12]. Стержни последнего размещены в трубках диаметром 20 мм, которые собраны в пакет с треугольной компоновкой и образуют блок катализатора. Такая конструкция обеспечивает повышение производительности за счет интенсификации конвективных движений от нагретой поверхности.

**Катализатор на носителе в форме пластин.** Пример использования в устройстве рекомбинатора водорода данного типа катализатора приведен на рис. 1. Кассета 2, состоящая из пластин, размещена в нижней части корпуса 1. Газовая смесь через входное отверстие и кассету 2 попадает внутрь корпуса 1 и выходит в котайнмент через выходное отверстие 4. Рекомбинация идет на поверхности пластин 5 кассеты 2. За счет высоты корпуса рекомбинатора, значительно превышающей длину пластин, развивается дополнительная тяга и интенсифицируется подвод и преобразование состава газовой смеси в устройстве. Для обслуживания кассета извлекается из корпуса.

Периодически активность катализатора проверяется и восстанавливается путем отжига. Температура отжига ограничена термостойкостью гидрофобного покрытия.

Количество гетерогенного катализатора пропорционально площади поверхности, на которой он размещен. Поэтому обычно поверхность пластины покрывают высокопористой основой, на которую наносят каталитическое покрытие. Материал основы должен быть прочным, работоспособным при высоких температурах, технологичным и недорогим, желателен влагостойким и иметь показатель доступной площади пор на уровне порядка 200 м<sup>2</sup>/г. Такими свойствами обладает гамма-форма оксида алюминия.

Толщина каталитического покрытия, состоящего из субстрата платины (Pt/Pd), имеет субмикронный порядок. Плотность покрытия платиной составляет 5 г на 1 м<sup>2</sup> пластины (Passive Autocatalytic Recombiner, см.: [www.us.areva.com](http://www.us.areva.com)). Технология изготовления включает в себя следующие этапы: термообработка алюмосодержащего сырья до формирования высокопористого оксида, пропитка его соединениями платины, обжиг до выпадения частиц металла на поверхности пор. Такой катализатор использовать неудобно, поскольку оксид алюминия адсорбирует воду (даже из практически сухого воздуха). Вода занимает часть поверхности, доступ реагентов к катализатору затрудняется. Типичное соотношение масс: 10 г воды на 100 г оксида (адсорбент гамма-оксид алюминия модифицированный, см.: <http://eksytech.ru/adsorbent-gamma-oksidi-aluminiya.html>). В рабочем процессе катализатор нагрет и продувается реагентами, влияние воды может быть незаметно. При пуске из холодного состояния влажного катализатора потребуется дополнительное время, пока вода испарится и производительность достигнет номинального уровня.

Для адаптации к работе во влажных условиях применяется гидрофобизация катализатора. Например, осуществляется продувка катализатора фторсодержащим углеводородом-мономером с последующим формированием полимерного покрытия на поверхности. В результате влагоемкость снижается до 5 г воды на 100 г оксида (аторское свидетельство 1780828 СССР, МПК5 В 01 J 23/42, 34/37 «Катализатор для дожигания водорода и способ его получения», авторы – В.Н. Новгородов, М.В. Шмыгова, Н.Б. Коваленко, В.А. Жеребцов).

**Расчет элементарной ячейки рекомбинатора водорода.** В составе рекомбинатора (см. рис. 1) выделим элементарную ячейку (рис. 2), которая представляет собой щелевой канал, ограниченный стенками. Стенки образованы пластинами с каталитическим покрытием.

На рис. 2 используются следующие обозначения:  $\delta$  – расстояние между пластинами, 10 мм;  $L$  – длина пластин, 140 мм;  $T_w$  – местная температура стенки пластины;  $T$  – местная температура газа;  $T_0$  и  $T_L$  – температура среды соответственно на входе и на выходе;  $V$  – скорость среды;  $g$  – ускорение свободного падения, 9,8 м/с<sup>2</sup>. Размеры канала приняты по [22].

Течение носит ламинарный характер, пограничные слои смыкаются на половине длины ячейки. Эквивалентный диаметр щели  $D = 2\delta$ .

Число Рейля определяется согласно выражению  $Ra = gL^3\beta\langle\Delta T\rangle/\nu\alpha$ . Здесь:  $\langle\Delta T\rangle = \langle T_w \rangle - T_0$ , где  $\langle T_w \rangle$  – средняя температура стенки;

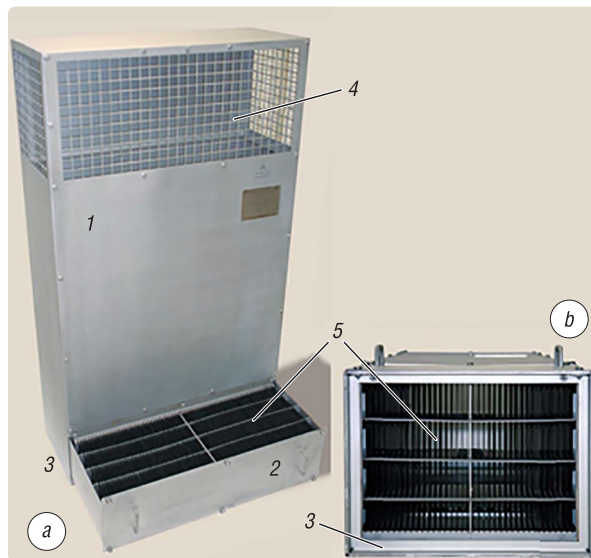


Рис. 1. Устройство рекомбинатора водорода [16]: 1 – корпус, 2 – кассета, 3 – входное отверстие, 4 – выходное отверстие, 5 – пластины; а – вид сбоку, кассета выдвинута для обслуживания пластин; б – вид снизу, кассета в рабочем положении

Fig. 1. Passive autocatalytic recombiner design [16]: 1 – vessel, 2 – cassette, 3 – inlet window, 4 – outlet window, 5 – catalytic plates; a – side view, cassette is moved out to serve plates; b – bottom view, cassette is ready to work

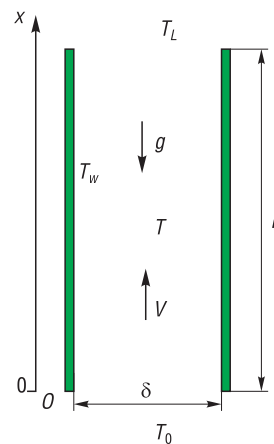


Рис. 2. Элементарная ячейка

Fig. 2. Elementary catalytic cell

$\beta$  – коэффициент объемного расширения;  $a$  – температуропроводность;  $\nu$  – кинематическая вязкость среды. При  $Ra/X > 1,5 \cdot 10^4$ ,  $X = L/D$  коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  составит [19]

$$\alpha/\alpha(Ra = 0) \approx 0,17(Ra/X)^{0,18}. \quad (1)$$

$Nu(Ra = 0) = 8,24$ ;  $\alpha(Ra = 0) = \lambda Nu(Ra = 0)/D$ ,  $\lambda$  – теплопроводность среды. Параметры атмосферы выбираются при температуре  $T_{cp} = (\langle T_w \rangle + T_0)/2$ .

Источником поддержания температуры пластин выступает каталитическое превращение водорода в водяной пар. Водород поступает на стенку за счет диффузии из потока среды. Далее следуют адсорбция, поверхностная диффузия, реакция и десорбция, диффузия продуктов реакции в поток. Кинетические характеристики процессов приведены, например, в [14]. Поскольку до появления водорода пластина находится в контакте с воздухом, платиновые структуры оказываются предварительно насыщенными кислородом.

Платина хорошо адсорбирует водород. Энергия адсорбции двух атомов водорода на платине близка к энергии связи водород–водород, поэтому реакция  $H_2 \leftrightarrow 2H_{ад}$  протекает относительно легко. Адсорбированные на платине атомы окисляются с большой скоростью [15].

В атмосфере герметичной оболочки наиболее вероятный состав газов – это бедная водородно-кислородная смесь с большим количеством разбавителей, в основном азота и водяного пара. В таких условиях реакция превращения водорода в воду имеет первый порядок по водороду и мало зависит от присутствия других веществ [14, 16–20].

Скорость реакции  $r_{H_2}$  на поверхности,  $кг/(м^2 \cdot с)$  задается выражением

$$r_{H_2} = 5,56 \cdot 10^{-3} (T_w)^{1/2} C_{H_2}, \quad (2)$$

где  $C_{H_2}$  – концентрация водорода,  $кг/м^3$ . В качестве концентрации водорода выбирается местная средняя по сечению щели величина.

Константа поверхностной реакции  $K_s$ ,  $м/с$ , связана с  $r_{H_2}$  выражением  $r_{H_2} = K_s C_{H_2}$ . Форма  $K_s \sim (T_w)^{1/2}$  предлагалась в [21]. Коэффициент перед формой определяется по данным [22]. Уравнение  $r_{H_2} = 14 \exp[-14,9 \cdot 10^3 / (RT_w)] C_{H_2}$ , в котором  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,3$  Дж/(моль · К), рекомендовано для расчетов в [23]. По нашему мнению, выражение переоценивает наблюдаемое влияние температуры на скорость реакции по сравнению с экспериментальными данными [22], полученными в лабораторном щелевом канале.

Будем представлять рабочую среду ячейки рекомбинатора водорода как смесь водорода с воздухом. Коэффициент диффузии водорода в воздухе  $D$  определяется формулой  $D = D_i (T/T_i)^2 (p_i/p)$ , где  $D_i = 7,4 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с при  $T_i = 300$  К и  $p_i = 0,1$  МПа,  $T$  и  $p$  – соответственно температура и давление среды. Далее в расчетах в качестве  $T$  берется местная средняя по сечению температура газа в щели.

В силу подобия процессов тепло- и массоотдачи в ячейке можно принять  $Nu = Sh (K_s = \infty)$ , где  $Sh$  – число Шервуда,  $Sh = \alpha_M D/D$ ;  $\alpha_M$  – коэффициент массоотдачи пластины. Запишем выражение для реакции первого порядка [24]

$$Sh = 1/[1/k_s + 1/Sh(K_s = \infty)], \quad (3)$$

где  $k_s$  – безразмерная скорость реакции,  $k_s = K_s D/D$ . Эффект реакции сводится к дополнительному сопротивлению диффузионному переносу массы. Поток массы водорода на пластину  $q_M$  задает тепловой поток от пластины к газу в щели  $q_T$ , связанный с местной температурой стенки  $T_w$ :

$$hq_M = h (DSh/D) C_{H_2} = q_T = \alpha (T_w - T), \quad (4)$$

где  $h$  – теплота горения водорода,  $h = 121$  МДж/кг;  $T$  – местная средняя по сечению температура газа в щели.

Система уравнений (1)–(4) замкнута. Концентрация водорода массовая  $C_{H_2}$ ,  $кг/м^3$ , связана с объемной концентрацией водорода  $\varepsilon$ , об.%, формулой  $C_{H_2} = 2\varepsilon\rho/29(1-\varepsilon)$ , в которой  $\rho$  – плотность воздуха; коэффициент объемного расширения  $\beta = 1/(T_{cp} + 273)$ ,  $К^{-1}$ ;  $\Delta T = T_w - T_0$ ; коэффициент массоотдачи пластины  $\alpha_M = D(1/Nu + 1/k_s)/D$ ;  $T_w = T_0 + hC(\alpha_M/\alpha)$ .

В ходе расчета ячейки выбирается шаг по длине пластины  $dx \ll L$ , вычисляются приращения на шаге  $dC_{H_2} = -(\alpha_d C_{H_2}/V)(dx/D)$ ,  $dT = -(h/c_p \rho) dC_{H_2}$ , по приращениям  $dC_{H_2}$  и  $dT$  определяется убыль концентрации водорода и возрастание температуры по ходу течения среды.

Результаты расчетов для смеси воздуха и водорода при  $T_0 = 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p = 0,1\text{ МПа}$  и  $V = 0,8\text{ м/с}$  представлены на рис. 3 и 4.

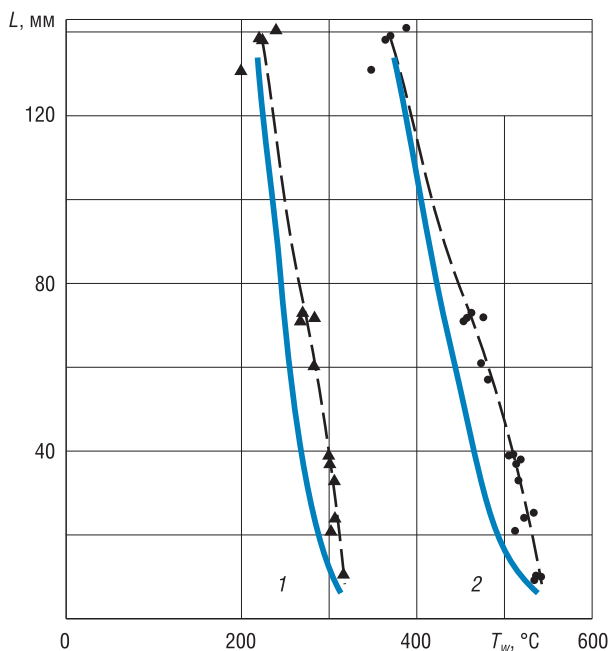


Рис. 3. Изменение температуры катализатора по длине канала: концентрация водорода: 1 – 2 об.%, 2 – 4 об.%; сплошная линия – расчет, пунктирная – эксперимент [22]

Fig. 3. Catalyst temperature variation vs channel length: hydrogen concentration: 1 – 2 vol.%, 2 – 4 vol.%; solid line – calculations, dashed – experiment [22]

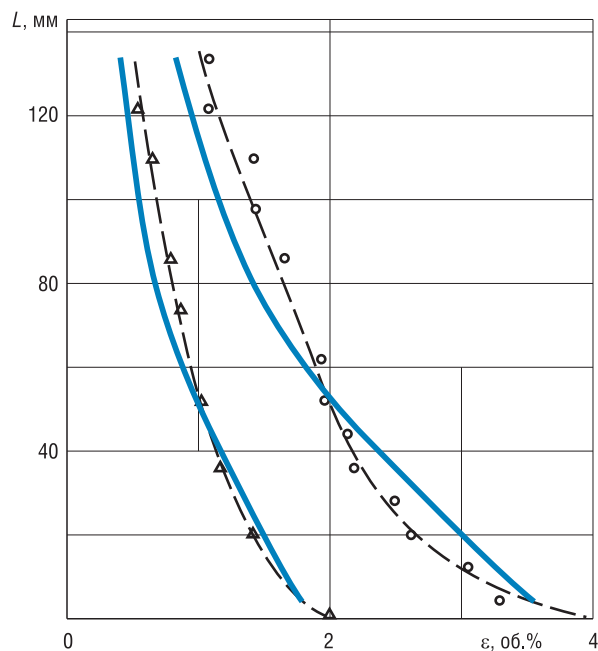


Рис. 4. Изменение концентрация водорода по длине канала: сплошная линия – расчет, пунктирная – эксперимент [22]

Fig. 4. Hydrogen concentration vs channel length: solid line – calculations, dashed – experiment [22]

Расчеты нескольких рабочих режимов для лабораторного канала представлены в табл. 1, где  $\epsilon_L/\epsilon_0$  – относительная концентрация водорода на выходе («недожег»),  $Nu/k_s$  – отношение сопротивлений диффузионного к дополнительному, связанному с конечностью скорости реакции на катализаторе,  $p_0$  – давление в контейнменте,  $\epsilon_0, \epsilon_L$  – концентрация водорода на входе и выходе соответственно,  $T_w^{\max}$  – максимальная температура катализатора.

**Расчет рекомбинатора водорода.** Определим характеристики пассивного каталитического рекомбинатора водорода для устройства FR90/1-1500 (AREVA).

В отличие от экспериментов, где скорость газа является заданной, в рекомбинаторе водорода скорость устанавливается балансом подъемной силы тягового участка  $(\rho_{\text{вход}} - \rho_{\text{выход}})gH$  и сопротивления устройства  $\zeta \rho_{\text{выход}} (W_{\text{выход}})^2/2$ , где  $H$  – высота тягового участка,  $\zeta$  – коэффициент гидравлического сопротивления.

Из описания рекомбинатора FR90/1-1500 (AREVA Passive Autocatalytic Recombiner. AREVA GmbH, 2013. G-008-V3-13-ENGPB) известно, что его производительность при концентрации водорода в воздухе 4 об.% и давлении 0,15 МПа составляет 5,36 кг/ч. Предположив, что начальная температура при определении производительности составляла 25 °С, с использованием рассчитанных температур и скоростей вычислим  $\zeta = 2,88$  (в дальнейшем принимается  $\zeta = 3$ ). Высота тягового участка определена величиной 0,6 м как расстояние от верха пластин с катализатором до низа фронтального выхлопного окна. Скорость  $W_{\text{выход}}$  подбирается по условию баланса с учетом температуры на выходе из элементарных ячеек.

Т а б л и ц а 1. Расчеты лабораторного канала  
T a b l e 1. Laboratory channel parameters calculated

$p_0$ , МПа	$T_0$ , °С	$\langle T_w \rangle$ , °С	$T_w^{\max}$ , °С	$\epsilon_0$ , об.%	$\epsilon_L/\epsilon_0$	$Nu/k_s$
0,1	25	430	526	4	0,17	1,31–1,45
0,1	125	464	480	2	0,11	1,77–1,80
0,15	25	589	838	4	0,22	0,94–1,17
0,3	25	920	1320	4	0,35	0,59–0,77
0,3	125	876	1270	4	0,25	0,61–0,79
0,3	125	658	978	2	0,27	0,52–0,68

Т а б л и ц а 2. **Расчеты рабочих режимов рекомбинатора при  $p_0 = 0,3$  МПа,  $T_0 = 125$  °С**

Т а б л и ц а 2. **Recombiner working parameters, calculated at  $p_0 = 0.3$  МПа,  $T_0 = 125$  °С**

Характеристика	Значение	
	при $\varepsilon_0 = 2$ об.%	при $\varepsilon_0 = 4$ об.%
$V$ , м/с	0,83	0,95
$\varepsilon_L/\varepsilon_0$	0,28	0,31
$\langle T_w \rangle$ , °С	662	890
$T_w^{\max}$ , °С	971	1224
$T_L$ , °С	241	350
$G$ , кг/ч	3,51	7,68
$Nu/k_s$	0,53–0,68	0,61–0,79

Производительность рекомбинатора равна сумме производительностей ячеек. Скорость на входе в рекомбинатор согласно расчету составляет 1 м/с, температура катализатора средняя – 606 °С, максимальная – 811 °С, содержание водорода в выхлопной струе 1,22 об.%.  
Предложенная модель выгодно отличается от известных [3, 14, 16–19, 22] построенных на базе CFD расчетов простотой и быстродействием, позволяет проводить независимые расчетные оценки.

Значения температуры и давления не характерны для аварий с течами теплоносителя и плавлением активной зоны реактора, более вероятные рабочие режимы рекомбинатора рассчитаны и приведены в табл. 2,  $G$  – производительность нейтрализации водорода.

Согласно табл. 2, производительность устройства не меньше заявленной в «AREVA Passive Autocatalytic Recombiner» (AREVA GmbH, 2013. G-008-V3-13-ENGPB).

Согласно табл. 2, производительность устройства не меньше заявленной в «AREVA Passive Autocatalytic Recombiner» (AREVA GmbH, 2013. G-008-V3-13-ENGPB).

Температуры катализатора, даже средние, выше 500 °С, в выхлопной струе значительно содержание водорода, температура струи  $T_L$  более 150 °С.

На рис. 5 приведены зависимости производительности рекомбинатора от объемной доли водорода в атмосфере герметичной оболочки для характерных наборов параметров атмосферы при тяжелой аварии. Видно, что производительность рекомбинатора линейно зависит от объемной концентрации водорода, влияние температуры атмосферы слабое.

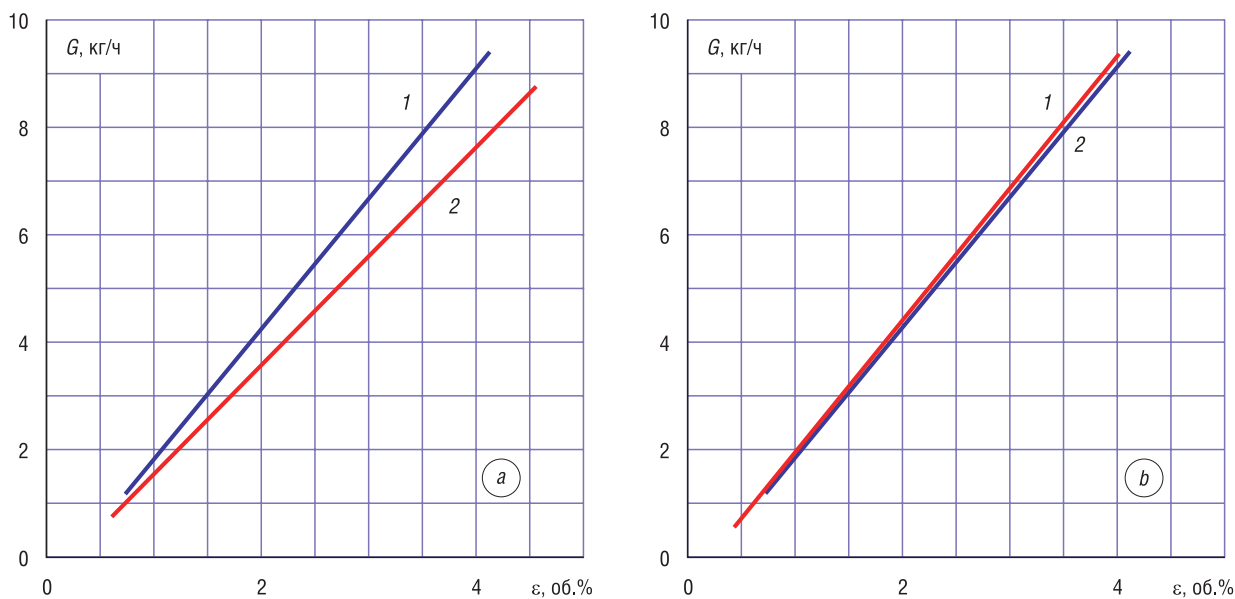


Рис. 5. Зависимость производительности рекомбинатора от объемной доли водорода в атмосфере герметичной оболочки: 1 – давление 0,4 МПа, температура 140 °С; 2 – 0,3 МПа, 125 °С (а) и 0,4 МПа, 120 °С (б)

Fig. 5. Recombiner capacity vs hydrogen concentration in the containment atmosphere: 1 – pressure 0.4 МПа, temperature 140 °С; 2 – 0.3 МПа, 125 °С (а), and 0.4 МПа, 120 °С (б)

**Влияние размещения рекомбинаторов водорода внутри герметичного ограждения на их суммарную производительность.** Известна проблема оптимальной расстановки рекомбинаторов при проектировании ВВЭР, для которой еще не предложено решение [6]. Как следует расположить устройства в герметичном объеме, чтобы достичь максимальной производительности? В составе атмосферы ГО локализирующей системы водород может быть распределен неравномерно ([6, 25]; Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных станций. Руководства № NS – G – 1.10. Вена: МАГАТЭ, 2008; European Utility Requirements for LWR Nuclear

Power Plants. Vol. 2: Generic Nuclear Island Requirements. Ch. 9: Containment System. Revision C. April, 2001). Рекомбинатор должен быть установлен в месте, где находится достаточное количество водорода [6, 26]. Расчет показывает хаотичное распределение водорода по ГО, причем случаи распределения водорода при течи, расположенной сверху, существенно отличаются от течей боковой локализации [26]. В боксе, где находится течь, производительность рекомбинатора может быть существенно выше, чем под куполом ГО или в соседнем боксе, где течи нет.

Рекомбинаторы размещаются до аварии, причем эффективность работы каждого из них зависит не только от конкретного типа аварии, но и варианта ее конкретной реализации. Например, при малой течи и обесточивании важно, где именно произошла течь. Равномерности распределения водорода способствует действие спринклерной системы (Проектирование систем защитной оболочки реактора для атомных станций. Руководства № NS – G – 1.10; European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants. Vol. 2: Generic Nuclear Island Requirements. Ch. 9: Containment System. Revision C. April, 2001; [27–30]). Данную систему включают в ходе аварии при начале повреждения активной зоны для повышения концентрации пара и инертизации состава атмосферы. В это же время ожидается начало первого пика выхода водорода.

Для рекомбинаторов с линейной рабочей характеристикой  $G(\epsilon)$ , как в нашем случае, все установки оказываются равнозначными, поскольку производительность всех устройств при равномерной концентрации водорода будет совпадать с таковой при неравномерной при условии равенства концентраций в среднем по объему. Последнее условие обеспечивается плотностью герметичного ограждения.

**Заключение.** Рассчитаны характеристики пассивного каталитического рекомбинатора водорода в условиях аварии на АЭС-2006. Производительность устройства в условиях аварии не меньше заявленной производителем. Температура катализатора, в том числе средняя по поверхности, выше 500 °С, температура выхлопной струи превышает 150 °С, в выхлопной струе значительно содержание водорода.

Разработанная автором расчетная модель рекомбинатора отличается простотой и быстродействием, позволяет проводить независимые расчетные оценки на любом персональном компьютере без использования коммерческого CFD программного обеспечения.

Данные расчетов могут использоваться для оценки работы рекомбинаторов водорода при аварии на АЭС-2006.

### Список использованных источников

1. Обеспечение водородной безопасности АЭС с ВВЭР-1000 / В. В. Безлепкина [и др.] // Теплоэнергетика. – 2002. – № 5. – С. 5–12.
2. Велькер, М. Инновационные технологии для обеспечения безопасности АЭС, как следствие аварии на АЭС Фукусима / М. Велькер // 7-я международная выставка и конференция «Атомэкспо-Беларусь 2015», Минск, 22–24 апр. 2015: офиц. каталог. – Минск, 2015. – С. 59.
3. Reinecke, E.-A. Operational behaviour of passive auto-catalytic hydrogen recombiners [Electronic resource] / E.-A. Reinecke, G. Poss // Nucl. Eng. Int. – 2012. – Mode of access: <https://www.neimagazine.com/features/featureoperational-behaviour-of-passive-auto-catalytic-hydrogen-recombiners>
4. Большов, Л. А. Уроки Чернобыля и Фукусимы и современные концепции управления «тяжелыми» авариями / Л. А. Большов // X Международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики», Москва, 25–27 мая 2016 г.: сб. тр. / АО «Концерн Росэнергоатом». – М., 2016. – С. 13–14.
5. Safety Research Opportunities Post-Fukushima: Initial Report of the Senior Expert Group: Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2016)19. – Paris: CSNI, 2017. – 190 p.
6. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И. А. Кириллов [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 2 (84). – С. 1–12.
7. Домашенко, А. М. Проблемы взрывобезопасности при создании и эксплуатации промышленных систем хранения и транспортирования жидкого водорода. Стандарты / А. М. Домашенко // Альтернативная энергетика и экология. – 2006. – № 11 (43). – С. 28–38.
8. Состояния и условия взрывобезопасности в проектных режимах АЭС с ВВЭР / В. И. Скалозубов [и др.] // Проблемы безопасности атомных электростанций и Чернобыля. – 2012. – Вып. 18. – С. 31–38.
9. Проект АЭС-2006. Основные концептуальные решения на примере Ленинградской АЭС-2. ОАО «СПбАЭП». – СПб.: Ин-т «Атомэнергопроект», 2011. – 40 с.

10. State of the art on hydrogen passive autocatalytic recombiner (European Union parsoar project) [Electronic resource] / F. Arnould [et al.]. – Mode of access: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/020/33020098.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020098.pdf) – Date of access: 09.02.2018.
11. Исследование беспламенного горения водорода на поверхности гидрофобизированного катализатора / Ю. Н. Шебеко [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1995. – Т. 31, № 5. – С. 37–38.
12. Тарарыкин, А. Г. Каталитические рекомбинаторы водорода для систем аварийной безопасности АЭС / А. Г. Тарарыкин // Безопасность окружающей среды. – 2007. – № 3. – С. 46–49.
13. Кутателадзе, С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление: справ. пособие / С. С. Кутателадзе. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 367 с.
14. Understanding of the operation behaviour of a Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water nuclear Reactor (LWR) accident / F. Payota [et al.] // Nucl. Eng. Des. – 2012. – Vol. 248. – P. 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.03.042>
15. Коровин, Н. В. Электрохимические генераторы / Н. В. Коровин. – М.: Энергия, 1974. – 208 с.
16. Rožeň, A. A mechanistic model of a passive autocatalytic hydrogen recombiner / A. Rožeň // Chem. Process Eng. – 2015. – Vol. 36, № 1. – P. 3–19. <https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0001>
17. CFD Analysis of Passive Autocatalytic Recombiner / B. Gera [et al.] // Science and Technology of Nuclear Installations. – 2011. – Article ID 862812. <https://doi.org/10.1155/2011/862812>
18. Конвективный теплообмен с химическими превращениями в вертикальном канале / Д. Г. Григорул [и др.] // Теплоэнергетика. – 2011. – № 6. – С. 63–67.
19. Математическое моделирование тепло- и массообмена в пассивном каталитическом рекомбинаторе водорода / С. В. Анпилов [и др.] // Теплоэнергетика. – 2013. – № 11. – С. 48–51.
20. Borekov papers [Electronic resource]. – Mode of access: [www.catalysis.ru/resources/html/borekov\\_papers/glava2.doc](http://www.catalysis.ru/resources/html/borekov_papers/glava2.doc) – Date of access: 11.08.2016.
21. Prabhudharwadkar, D. M. Simulations of hydrogen mitigation in catalytic recombiner. Part I: Surface chemistry modeling / D. M. Prabhudharwadkar, P. A. Aghalayam, K. N. Iyer // Nucl. Eng. Des. – 2011. – Vol. 241, № 5. – P. 1746–1757. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.032>
22. Modelling of Catalytic Recombiners: Comparison of REKO-DIREKT Calculations with REKO-3 Experiments / E.-A. Reinecke [et al.] // Int. Conf. Nuclear Energy for New Europe. Bled, Slovenia, September 5–8, 2005. – Paper 92. – 10 p.
23. Schefer, R. W. Catalyzed combustion of H<sub>2</sub>/air mixtures in a flat plate boundary layer. II. Numerical model / R. W. Schefer // Combustion and Flame. – 1982. – Vol. 45. – P. 171–190. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90043-8)
24. Химическая гидродинамика: справ. пособие / А. М. Кутепов [и др.]. – М.: Бюро Квантум, 1996. – 336 с.
25. Conclusions on severe accident research priorities / W. Klein-Heßling [et al.] // Ann. Nucl. Energy. – 2014. – Vol. 74. – P. 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.015>
26. Park, K. Hydrogen concentration variation and examination of PAR installation in reactor containment building during hydrogen release from different direction failure places / K. Park, Kyung-Hyo Bae // Nucl. Eng. Des. – 2014. – Vol. 278, № 11. – P. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.07.021>
27. Achievements of spray activities in nuclear reactor containments during the last decade / J. Malet [et al.] // Ann. Nucl. Energy. – 2014. – Vol. 74. – P. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.05.033>
28. Malet, J. Influence of spray characteristics on local light gas mixing in nuclear containment reactor applications / J. Malet, X. Huang // Computers and Fluids. – 2015. – Vol. 107. – P. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.10.002>
29. Effect of spray on performance of the hydrogen mitigation system during LB-LOCA for CPR1000 NPP / X. G. Huang [et al.] // Ann. Nucl. Energy. – 2011. – Vol. 38, № 8. – P. 1743–1750. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.04.003>
30. Расчетно-экспериментальное исследование перемешивания легкого газа в рамках проектов ERCOSAM – SAMARA / А. М. Бахметьев [и др.] // Атом. энергия. – 2017. – Т. 123, вып. 1. – С. 3–9.

## References

1. Bezlepkin V. V., Golikov Yu. A., Kukhtevich I. V., Solov'ev V. P., Smirnov V. V. Ensuring the hydrogen safety of an NPS with a VVER-1000 reactor. *Teploenergetika = Thermal Engineering*, 2002, no. 5, pp. 5–12 (in Russian).
2. Welker M. Post-Fukushima innovations for NNP safety. *7-ya Mezhdunarodnaya vystavka i konferentsiya "Atomexpos-Belarus' 2015"*, Minsk, 22–24 aprelya 2015: *ofitsial'nyi katalog* [7th International Exhibition and Conference "Atomexpo-Belarus 2015", Minsk, April 22–24, 2015: Official Catalog]. Minsk, 2015, p. 59 (in Russian).
3. Reinecke E.-A., Poss G. Operational behaviour of passive auto-catalytic hydrogen recombiners. *Nuclear Engineering International*, 2012. Available at: <https://www.neimagazine.com/features/featureoperational-behaviour-of-passive-auto-catalytic-hydrogen-recombiners>
4. Bolsov L. A. Lessons of Chernobyl and Fukushima and modern concepts of severe accidents control. *X Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoi energetiki" Moskva, 25–27 maya 2016 g.: sbornik trudov* [X International Scientific and Technical Conference "Safety, Efficiency and Economics of Nuclear Power Industry", Moscow, 2016 May, 25–27: Collection of Works]. Moscow, 2016, pp. 13–14 (in Russian).
5. *Safety Research Opportunities Post-Fukushima: Initial Report of the Senior Expert Group: Nuclear Safety NEA/CSNI/R(2016)19*. Paris, CSNI, 2017. 190 p.
6. Kirillov I., Kharitonova N., Sharafutdinov R., Krenniikov N. Hydrogen safety for nuclear power plants with light water reactor units. current state of the problem. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2017, no. 2 (84), pp. 1–12 (in Russian).



7. Domashenko A.M. Safety of industrial systems for designing, exploiting and transporting of liquid hydrogen. *Al'ternativnaya energetika i ekologiya = Alternative Energy and Ecology*, 2006, no. 11, pp. 28–38 (in Russian).
8. Skalozubov V. I., Vaschenko V. M., Jarovoy S. S., Zlochevski V.V. Blow up safety of NPP AES VVER operation regimes. *Problemi bezpeki atomnikh elektrostantsii i Chornobilya* [Problems of Nuclear Power Plants' Safety and of Chornobyl], 2012, iss. 18, pp. 31–38 (in Russian).
9. *NPP AES-2006 design. Main concepts exemplified by Leningrad-2 NPP design. JSC Atomenergoproekt SPb*. St. Petersburg, Atomenergoproekt, 2011. 40 p. (in Russian).
10. Arnould F., Bachelier E., Auglaire M., De Boeck B., Braillard O., Eckardt B., Ferroni F., Moffett R., Van Goethem G. State of the art on hydrogen passive autocatalytic recombiner (European Union parsoar project). Available at: [http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/\\_Public/33/020/33020098.pdf](http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/33/020/33020098.pdf) (accessed 09 February 2018).
11. Shebeko J. N., Nrunev A. V., Shepelin V. A., Navtcena V. J., Zaycev A. A. Flameless combustion of hydrogen on water-proofed catalytic surface. *Fizika gorennya i vzryva = Combustion, Explosion and Shock Waves*, 1995, vol. 31, no. 5, pp. 37–38 (in Russian).
12. Tartarykin A.G. Hydrogen Catalytic recombiners for NPP safety systems. *Bezopasnost' okruzhayushchei sredy* [Environmental Safety], 2007, no. 3, pp. 46–49 (in Russian).
13. Kutateladze S. S. *Heat Transfer and Drug*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990. 367 p. (in Russian).
14. Payot F., Reinecke E.-A., Morfin F., Sabroux J.-C., Zeyen R. Understanding of the operation behaviour of a Passive Autocatalytic Recombiner (PAR) for hydrogen mitigation in realistic containment conditions during a severe Light Water nuclear Reactor (LWR) accident. *Nuclear Engineering and Design*, 2012, vol. 248, pp. 178–196. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2012.03.042>
15. Korovin N.V. *Electrochemical Generators*. Moscow, Energiya Publ., 1974. 208 p. (in Russian)
16. Rožen A. A mechanistic model of a passive autocatalytic hydrogen recombiner. *Chemical and Process Engineering*, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 3–19. <https://doi.org/10.1515/cpe-2015-0001>
17. Gera B., Sharma P. K., Singh R. K., Vaze K.K. CFD Analysis of Passive Autocatalytic Recombiner. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2011, article ID 862812. <https://doi.org/10.1155/2011/862812>
18. Grigoruk D. G., Kondratenko P. S., Nikol'skii D. V., Chizhov M.E. Convective Heat Transfer with Chemical Transformations in a Vertical Channel. *Thermal Engineering*, 2011, vol. 58, no. 6, pp. 513–518. <https://doi.org/10.1134/s0040601511060048>
19. Anpilov S. V., Grigoruk D. G., Kondratenko P. S., Khristenko E. B., Chizhov M.E. Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer in a Passive Autocatalytic Recombiner. *Thermal Engineering*, 2013, no. 11, pp. 818–822. <https://doi.org/10.1134/s0040601513110013>
20. *Boreskov papers*. Available at: [www.catalysis.ru/resources/html/boreskov\\_papers/glava2.doc](http://www.catalysis.ru/resources/html/boreskov_papers/glava2.doc) (accessed 11 August 2016).
21. Prabhudharwadkar D. M., Aghalayam P. A., Iyer K.N. Simulations of hydrogen mitigation in catalytic recombiner. Part I: Surface chemistry modeling. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, no. 5, pp. 1746–1757. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2010.09.032>
22. Reinecke E.-A., Boehm J., Drinovac P., Struth S. Modelling of Catalytic Recombiners: Comparison of REKO-DIREKT Calculations with REKO-3 Experiments. *International Conference Nuclear Energy for New Europe, Bled, Slovenia, September 5–8, 2005*. Paper 92. 10 p.
23. Schefer R.W. Catalyzed combustion of H<sub>2</sub>/air mixtures in a flat plate boundary layer. II. Numerical model. *Combustion and Flame*, 1982, vol. 45, pp. 171–190. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(82\)90043-8](https://doi.org/10.1016/0010-2180(82)90043-8)
24. Kutepov A. M., Polyaniin A. D., Zapryanov Z. D., Vyazmin A. V., Kazenin D. A. *Chemical Hydrodynamics*. Moscow, Buro Kvantum Publ., 1996. 336 p. (in Russian).
25. Klein-Heßling W., Sonnenkalb M., Jacquemain D., Clément B., Raimond E., Dimmelmeier H. [et al.] Conclusions on severe accident research priorities. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, vol. 74, pp. 4–11. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.07.015>
26. Park K., Bae Kyung-Hyo. Hydrogen concentration variation and examination of PAR installation in reactor containment building during hydrogen release from different direction failure places. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, vol. 278, no. 11, pp. 229–238. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.07.021>
27. Malet J., Parduba Z., Mimouni S., Travis J. Achievements of spray activities in nuclear reactor containments during the last decade. *Annals of Nuclear Energy*, 2014, vol. 74, pp. 134–142. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.05.033>
28. Malet J., Huang X. Influence of spray characteristics on local light gas mixing in nuclear containment reactor applications. *Computers & Fluids*. 2015, vol. 107, pp. 11–24. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.10.002>
29. Huang X. G., Yang Y. H., Xu Cheng, Al-Hawshabi N. H. A. Effect of spray on performance of the hydrogen mitigation system during LB-LOCA for CPR1000 NPP. *Annals of Nuclear Energy*, 2011, vol. 38, no. 8, pp. 1743–1750. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.04.003>
30. Bakhmet'ev A. M., Bol'shukhin M. A., Kamnev M. A., Khizbullin A. M., Tyurikov O.V. Computational and Experimental Studies of Mixing of a Light Gas in the ERCOSAM–SAMARA Projects. *Atomnaya energiya = Atomic Energy*, 2017, vol. 123, iss. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0292-2>

### Информация об авторе

Сорокин Владимир Владимирович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [sorokin.npp@gmail.com](mailto:sorokin.npp@gmail.com)

### Information about the author

Vladimir V. Sorokin – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (p/o box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [sorokin.npp@gmail.com](mailto:sorokin.npp@gmail.com)

## ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

УДК 621.317+681.849

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-506-512>

Поступила в редакцию 18.11.2019

Received 18.11.2019

В. И. Соловьев<sup>1</sup>, О. В. Рыбальский<sup>2</sup>, В. В. Журавель<sup>3</sup>, В. К. Железняк<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля, Северодонецк, Украина

<sup>2</sup>Национальная академия внутренних дел, Киев, Украина

<sup>3</sup>Киевский научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр МВД Украины, Киев, Украина

<sup>4</sup>Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь

### ПРИМЕНЕНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ МОНТАЖА ЦИФРОВЫХ ФОНОГРАММ

**Аннотация.** Экспериментально доказана возможность создания построенной на основе нейронных сетей глубокого обучения эффективной системы, которая предназначена для выявления следов монтажа в цифровых фонограммах. Смысл эксперимента состоял в исследовании способности систем на основе таких сетей выявлять паузы со следами монтажа. Создан экспериментальный массив данных в звуковом редакторе из фонограмм, записанных на различной аппаратуре цифровой звукозаписи (при частоте дискретизации 44,1 кГц). Из него производился предварительный отбор пауз длительностью от 100 мс до нескольких секунд. Из отобранных 1000 пауз в автоматическом (компьютерном) режиме сформирован массив фрагментов пауз, из которого сгенерированы массивы фрагментов пауз разной длительности размерностью около 100 000. Для формирования массива фрагментов пауз с монтажом случайным образом выбранные паузы делились на части в произвольном соотношении. После этого из полученных частей создавались новые паузы с зафиксированным местом монтажа. Общий массив всех фрагментов пауз был разбит на тренировочный и тестовый массивы. Определялась наибольшая эффективность, достигаемая на тестовом массиве в процессе обучения. В общем случае эта эффективность определяется наибольшей величиной вероятности правильной классификации фрагментов с монтажом и фрагментов без монтажа. Предложена научно обоснованная методология выявления признаков монтажа в цифровых фонограммах на основе нейронных сетей глубокого обучения. Проведенные эксперименты показали, что возможно построение эффективной системы для выявления таких следов. Дальнейшее развитие методологии должно быть направлено на поиск путей повышения вероятности правильной бинарной классификации исследуемых пауз.

**Ключевые слова:** нейронная сеть глубокого обучения, точки монтажа, цифровая фонограмма, цифровой монтаж, экспертиза

**Для цитирования:** Применение нейронных сетей глубокого обучения для выявления монтажа цифровых фонограмм / В. И. Соловьев [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 506–512. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-506-512>

Victor I. Solovyov<sup>1</sup>, Oleg V. Rybalskiy<sup>2</sup>, Vadym V. Zhuravel<sup>3</sup>, Vladimir K. Zheleznyak<sup>4</sup>

<sup>1</sup>V. Dal Eastukrainian National University, Severodonetsk, Ukraine

<sup>2</sup>National Academy of Internal Affairs, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Kyiv Scientifically-Research Expertly-Criminalistics Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>4</sup>Polotsk State University, Novopolotsk, Belarus

### APPLICATION OF NEURON NETWORKS OF DEEP LEARNING FOR EXPOSURES EDITING OF DIGITAL PHONOGRAMS

**Abstract.** Possibility of creation of effective system, which is intended for exposure of tracks of editing in digital phonograms and is built on the basis of neuron networks of the deep learning, is experimentally proven. Sense of experiment consisted in research of ability of the systems on the basis of such networks to expose pauses with tracks of editing. The experimental array of data is created in a voice editor from phonograms written on the different apparatus of the digital audio

recording (at frequency of discretisation 44,1 kHz). A preselection of pauses was produced from it, having duration from 100 ms to a few seconds. From 1000 selected pauses the array of fragments of pauses is formed in the automatic (computer) mode, from which the arrays of fragments of pauses of different duration are generated by a dimension about 100 000. For forming of array of fragments of pauses with editing, the chosen pauses were divided into casual character parts in arbitrary correlation. Afterwards, the new pauses were created from it with the fixed place of editing. The general array of all fragments of pauses was broken into training and test arrays. The maximum efficiency, achieved on a test array in the process of educating, was determined. In general case this efficiency is determined by the maximum size of probability of correct classification of fragments with editing and fragments without editing. Scientifically reasonable methodology of exposure of signs of editing in digital phonograms is offered on the basis of neuron networks of the deep learning. The conducted experiments showed that the construction of the effective system is possible for the exposure of such tracks. Further development of methodology must be directed to find the ways to increase the probability of correct binary classification of investigated pauses.

**Keywords:** neuron network of deep learning, points of editing, digital phonogram, digital editing, examination

**For citation:** Solovyov V. I., Rybalskiy O. V., Zhuravel V. V., Zheleznyak V. K. Application of neuron networks of deep learning for exposures editing of digital phonograms. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 506–512 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-506-512>

**Введение.** Проверка отсутствия (или наличия) следов монтажа в цифровых фонограммах является одной из наиболее важных проблем экспертизы материалов и аппаратуры звукозаписи. В ряде работ отечественных и зарубежных авторов рассматривались вопросы ее решения [1–5]. В них предложены разные подходы – от спектрального анализа шумов до проверки метаданных. Однако до настоящего времени не найден метод, обеспечивающий высокую степень вероятности выявления монтажа.

Отметим, что в большинстве предложенных решений обязательно проведение сравнительных исследований параметров образцовых (экспериментальных) и спорных (представленных на экспертизу) фонограмм. Поэтому для записи образцовых фонограмм требуется предъявление на экспертизу аппаратуры, на которой записывались спорные фонограммы, что часто вообще невыполнимо из-за ряда специфических обстоятельств [6].

Давно разработанный в СССР и ныне широко используемый в странах ЕС метод, который основан на проверке частоты (или фазы) сигнала сетевой наводки, зафиксированного в фонограмме [3, 7], имеет ряд существенных недостатков. Из них следует отметить, например, необходимость постоянной фиксации частоты электросети во всех точках страны и, что наиболее существенно, невозможность выявления монтажа, выполненного методом вырезания и перестановки (используя паузы в речевых сигналах) фрагментов одной фонограммы [8]. Такой монтаж наиболее сложен для выявления экспертизой.

В наших предыдущих работах, например [9], были рассмотрены модели проявления в сигналах следов цифрового монтажа фонограмм, выполненного способом вырезания и перестановки фрагментов. Далее было экспериментально доказано, что следы такого монтажа проявляются в виде изменений фрактального состава монтируемых сигналов [10, 11]. Вместе с тем было показано, что, несмотря на наличие таких проявлений, их выделение из сигналов в виде конкретных признаков невозможно без проведения обширных исследований. Для этого потребовалось создать специальное программное обеспечение [10]. На сегодняшний день не предложено научно-обоснованного подхода, который бы позволил применять единую методологию выявления монтажа. Мы полагаем, что такая методология должна базироваться на большом объеме экспериментальных данных, поскольку апробация на массовом статистическом материале любого предлагаемого подхода в режиме «ручного исследования» практически нереализуема.

Последующий поиск направления создания таких программ показал, что наиболее перспективным представляется использование нейронных сетей глубокого обучения [11].

*Цель данной работы* – экспериментально доказать возможность создания эффективной системы, предназначенной для выявления следов монтажа в цифровых фонограммах и построенной на основе такой сети.

**Постановка и проведение эксперимента.** Эксперимент необходим для выяснения принципиальной пригодности выбранного направления. Его смысл состоит в исследовании способности систем на основе нейронных сетей глубокого обучения выявлять паузы со следами монтажа. Для создания экспериментального массива данных в звуковом редакторе из фонограмм, записанных на различной аппаратуре цифровой звукозаписи (при частоте дискретизации 44,1 кГц),

производился предварительный отбор пауз длительностью от 100 мс до нескольких секунд. Отбор производился в «ручном режиме». Таких пауз было отобрано примерно 1000, и они составили исходную базу эксперимента. Из отобранных пауз в автоматическом (компьютерном) режиме был сформирован массив фрагментов пауз. Для этого паузы сканировались окном длительностью 15–30 мс с интервалом 1 мс и из них вырезались фрагменты с длительностью окна сканирования. Таким образом, были сгенерированы массивы фрагментов пауз без монтажа разной длительности размерностью около 100 000. Для создания массива фрагментов пауз с монтажом случайным образом выбранные паузы делились на части в произвольном соотношении. После чего из полученных частей формировались новые паузы с зафиксированным местом монтажа. Затем сканированием этих пауз временным окном из зоны локализации монтажа вырезались фрагменты пауз с монтажом одинаковой длительности. Размерность массива фрагментов пауз с монтажом также составляла примерно 100 000.

Эти массивы фрагментов пауз без монтажа и с монтажом явились исходными массивами (dataset) для обучения нейронной сети.

Разработанная программная система базировалась на платформе PITON и библиотеке глубокого обучения нейронных сетей keras (backend tensorflow) со следующими основными параметрами нейронной сети: полносвязная нейронная сеть до 50 нейронных слоев с прореживанием (dropout) и пакетной нормализацией. Решалась задача бинарной классификации на массиве dataset. В далее проиллюстрированных экспериментах фрагменты массивов пауз длительностью 20 мс имели размерность 882.

Общий массив всех фрагментов пауз был разбит на тренировочный и тестовый массивы. Устанавливалась наибольшая эффективность, достигаемая на тестовом массиве в процессе обучения. В общем случае эта эффективность определяется наибольшей величиной вероятности правильной классификации фрагментов с монтажом и фрагментов без монтажа.

Пример формы настройки параметров нейронной сети, использованной при проведении эксперимента, показан на рис. 1.

The image shows a software window titled "Parameters window" with a blue background. It contains several sections for configuring a neural network:

- Dataset Directory for Neural Network Training:** A text input field containing "C:/SOM\_B\_TEST" and an "ok" button.
- Neural Network Test Data Array Directory:** A text input field containing "C:/SOM\_B\_TEST" and an "ok" button.
- Number of batch:** A text input field containing "100".
- Number of epochs:** A text input field containing "2000".
- Learning options:** A text input field containing "1440".
- Graph\_Test:** A text input field containing "1".
- Sample length:** A text input field containing "100".
- Forecast number:** A text input field containing "3".
- Number of neurons:** A text input field containing "40".
- Number of layers:** A text input field containing "15".
- Batch epochs:** A text input field containing "4".
- Proportion train:** A text input field containing "0.5".
- Continuing:** A checkbox labeled "Continuing" with a radio button and the text "Y,No".
- SAVE:** A yellow button located on the right side of the window.

Рис. 1. Окно параметров экспериментальной нейронной сети глубокого обучения

Fig. 1. Window of parameters of experimental neuron network of the deep learning

Процесс проведения эксперимента с использованием нейронной сети глубокого обучения проиллюстрирован на рис. 2 и 3. На рис. 2 показан результат, достигнутый сетью на обучающем массиве. Как видно, эффективность, достигнутая на базе обучения за 575 эпох, составляет 0,85. Такой результат получен в процессе обучения на компьютере с графическим адаптером (GPU).

На этом же рисунке указано, что на тестовом массиве максимальная эффективность составляет 0,76. На рис. 3 показаны совместные графики для тренировочного и тестового массивов фрагментов пауз.

В рамках проведенной оптимизации сети достигнута эффективность классификации 0,76. Безусловно, эта вероятность с точки зрения многообразия вариантов оптимизации не может являться предельной. Как показывают предварительные эксперименты, существенное повышение размерности массивов фрагментов пауз и, как следствие, возможности увеличения сложности нейронной сети позволяет увеличить эффективность.

Однако в задачах подобного рода вряд ли можно ожидать столь же высокой эффективности классификации, как, например, в задачах классификации изображений (0,99). В то же время структура задачи позволяет предложить рациональные решения, которые можно применить в задачах выявления монтажа. Ключевым моментом в решении данной задачи является введение понятия «пороговой» вероятности.

В задачах классификации обученная модель всегда позволяет получить вероятности правильной классификации. Как показывает анализ, около 30 % фрагментов пауз имеют вероятность такой классификации ниже значения 0,55. При превышении этого порога вероятности правильной классификации резко возрастают и достигают значения 0,99 и выше. На рис. 4 и 5 приведены графики зависимостей вероятности правильной классификации и прогнозируемых вероятностей ошибок классификации от «пороговой» вероятности. Отметим, что значения вероятности 0 и 1, приведенные на графиках рис. 4 и 5, в реальности являются лишь приближенными к ним значениями, но разрешающая способность выбранного масштаба изображения не позволяет отобразить это явление.

Также отметим, что в весьма специфических задачах практического выявления цифрового монтажа в фонограммах можно установить высокую «пороговую» вероятность, например равную 0,9. При этом вероятность правильной классификации будет не ниже 0,99. Но для решаемой задачи с практической точки зрения такая вероятность не очень высока. Так, на фрагментах пауз без монтажа общей длительностью 1 с при такой вероятности правильной классификации возможны 10 ложных результатов.

Введение «пороговой» вероятности при решении практических задач экспертизы

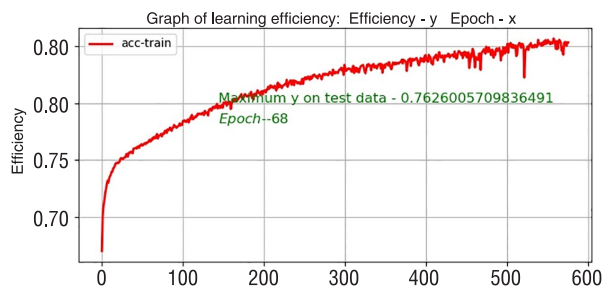


Рис. 2. График эффективности обучения  
Fig. 2. Chart of efficiency of educating

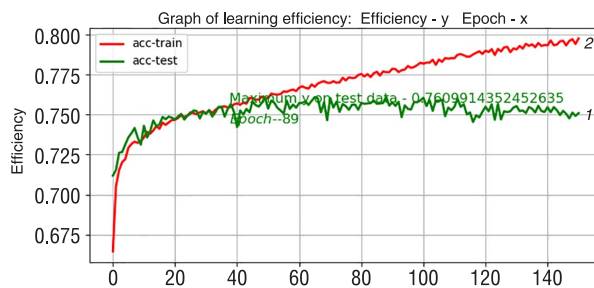


Рис. 3. Графики эффективности обучения: тестовый (1) и тренировочный (2) массивы  
Fig. 3. Charts of efficiency of educating: test (1) and training (2) arrays

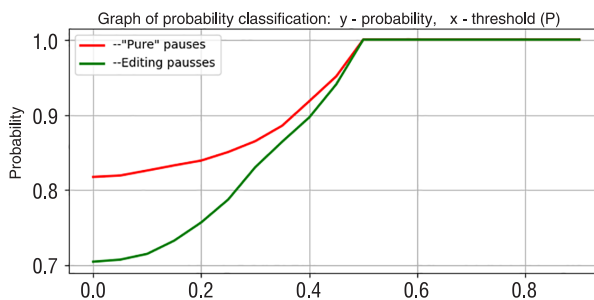


Рис. 4. Графики эффективности классификации  
Fig. 4. Charts of efficiency of classification

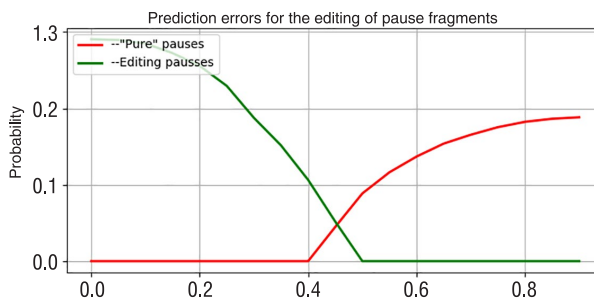


Рис. 5. Графики прогнозируемых ошибок классификации  
Fig. 5. Charts of the forecast errors of classification

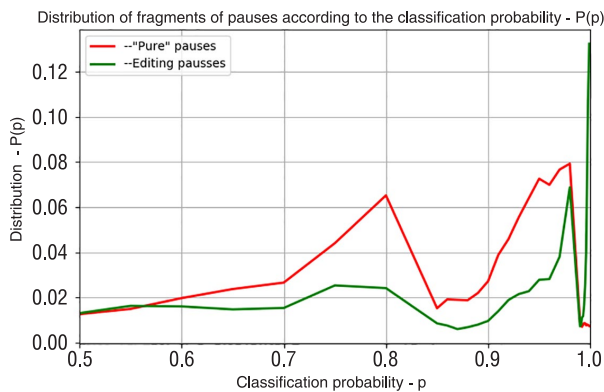


Рис. 6. Распределения фрагментов пауз с монтажом и без монтажа по вероятности правильной классификации (дискретный аналог плотностей вероятности)

Fig. 6. Distributions of fragments of pauses with editing and without editing on probability of correct classification (discrete analogue of probability density)

правильной классификации для этих фрагментов. Эти графики, полученные на тестовом массиве фрагментов, представлены рис. 6.

Графики показывают, что весовые доли фрагментов пауз с монтажом с высокой степенью вероятности правильной классификации значительно превышают весовые доли таких пауз без монтажа. Это значит, что среди пауз с монтажом преобладают паузы с высокой степенью вероятности правильной классификации, что свидетельствует о возможности и целесообразности применения нейронных сетей глубокого обучения для построения системы выявления монтажа в цифровых фонограммах.

При этом следует отметить, что для проведения экспериментов мы использовали лишь один из вариантов конфигурации таких сетей – полносвязную нейронную сеть. Однако существуют еще несколько вариантов их конфигурации, что говорит о возможности построения еще более эффективной системы.

**Выводы.** Проведенные экспериментальные исследования показали принципиальную пригодность нейронных сетей глубокого обучения для построения системы выявления следов цифровой обработки в фонограммах. Перспективность применения таких сетей состоит в возможности дальнейшего совершенствования как их конфигурации, так и методов предварительной обработки информации, что позволяет рассчитывать на достижение высокой эффективности такой системы.

### Список использованных источников

1. Рыбальский, О.В. Основные положения теории выявления следов цифровой обработки фонограмм и особенности ее программной и методической реализации в экспертизе материалов и средств видеозвукозаписи. Ч. 1 / О.В. Рыбальский // *Захист інформації*. – 2006. – № 1. – С. 71–76.
2. Nicolalde, D.P. Evaluating digital audio authenticity with spectral distances and ENF phase change / D.P. Nicolalde, J.A. Apolinario // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. – 2009. – Vol. 1. – P. 1417–1420. <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICASSP.2009.4959859>
3. Nicolalde, D.P. Audio authenticity: Detecting ENF discontinuity with high precision phase analysis / D.P. Nicolalde, J.A. Apolinario, L. W. P Biscainho // *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. – 2010. – Vol. 5. – P. 534–543. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2010.2051270>
4. Korycky, R. Methods of Time-Frequency Analysis in Authentication of Digital Audio Recordings / R. Korycky // *INTL Journal of Electronics and Telecommunications*. – 2010. – Vol. 56, № 3. – P. 257–262. <https://doi.org/10.2478/v10177-010-0033-0>
5. Бобрицкий, С.М. Дослідження ознак монтажу записів, виконаних цифровими записувачами пристроями / С.М. Бобрицкий, С.В. Стороженко // *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики: зб. наук. праць* / редкол.: М.Л. Цимбал [та ін.]. – Харків: Право, 2011. – Вип. 11. – С. 353–361.

соответствует пропуску фрагментов пауз с признаками монтажа и ложных срабатываний с низкой вероятностью. В то же время это соответствует природе исследуемого объекта (пауз). Это явление обусловлено тем, что и в паузах без монтажа, как правило, могут возникать выбросы малого уровня.

Чтобы прийти к окончательному выводу о возможности использования таких сетей для выявления монтажа, следовало установить, насколько велики будут потери в эффективности выявления пауз с монтажом при введении «пороговой» вероятности. Для этого были проведены дополнительные исследования отдельно для пауз с монтажом и для пауз без монтажа («чистых» пауз). Определялись распределения весовых долей фрагментов пауз по вероятности их правильной классификации (дискрет-

6. Журавель, В. В. Особенности формирования фонограмм, записанных с телефонных каналов / В. В. Журавель // Сучас. спец. техника. – 2015. – №4 (43). – С. 26–31.
7. Основы экспертного криминалистического исследования магнитных фонограмм / А. А. Ложкевич [и др.]. – М.: ВНИИ МВД СССР, 1977. – 172 с.
8. Рыбальский, О. В. Модели нестандартной подделки цифровых фонограмм / О. В. Рыбальский // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2003. – Т. 5, №4. – С. 25–32.
9. Рыбальский, О. В. Следы монтажа в цифровых фонограммах, выполненного способом вырезания и перестановки фрагментов / О. В. Рыбальский, В. И. Соловьев, В. В. Журавель // Реєстрація, зберігання і обробка даних. – 2016. – Т. 18, №1. – С. 32–41.
10. Рыбальский, О. В. Экспериментальная проверка эффекта изменения фрактального состава сигналов при монтаже фонограммы способом вырезания и перестановки фрагментов / О. В. Рыбальский, В. И. Соловьев, В. В. Журавель // Сучас. спец. техника. – 2016. – №3. – С. 75–85.
11. Рыбальский, О. В. Основные требования к системе выявления точек цифрового монтажа в фонограммах и методология ее создания / О. В. Рыбальский, В. И. Соловьев, В. В. Журавель // Інформатика та математичні методи в моделюванні. – 2018. – Т. 8, №3. – С. 232–237.

## References

1. Rybal'skii O. V. Substantive provisions of theory of exposure of tracks of digital treatment of phonograms and feature of her programmatic and methodical realization in examination of materials and facilities of the audio videorecording. Part 1. *Zakhyist informatsii = Ukrainian Information Security Research Journal*, 2006, no. 1, pp. 71–76 (in Russian).
2. Nicolalde D. P., Apolinario J. A. Evaluating digital audio authenticity with spectral distances and ENF phase change. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2009, vol. 1, pp. 1417–1420. <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/ICASSP.2009.4959859>
3. Nicolalde D. P., Apolinario J. A., Biscainho L. W. P. Audio authenticity: Detecting ENF discontinuity with high precision phase analysis. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2010, vol. 5, pp. 534–543. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2010.2051270>
4. Korycky R. Methods of Time-Frequency Analysis in Authentication of Digital Audio Recordings. *INTL Journal of Electronics and Telecommunications*, 2010, vol. 56, no. 3, pp. 257–262. <https://doi.org/10.2478/v10177-010-0033-0>
5. Bobritskii S. M., Storozhenko S. V. Research of signs of editing of the records executed by digital record devices. *Teoriya ta praktyka sudovoyi ecpertyzy i kriminalistiki: zbirnik naukovikh prats* [Theory and Practice of Forensic Science and Criminology: Collection of Scientific Papers]. Kharkov, Pravo Publ., 2011, Issue 11, pp. 353–361 (in Ukrainian).
6. Zhuravel' V. V. Features of forming of phonograms written in from telephone channels. *Suchasna spetsialna tekhnika* [Modern Special Technoqe], 2015, no. 4, pp. 26–31 (in Russian).
7. Lozhkevich A. A., Snetkov V. A., Chivanov V. A., Sharshunskii V. L. *Bases of Expert Criminalistics Research of Magnetic Phonograms*. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of the USSR Ministry of Internal Affairs, 1972. 172 p. (in Russian).
8. Rybal'skii O. V. Models of non-standard imitation of digital phonograms. *Regestratsiya, zberigannya i obrobka danykh = Data Recording, Storage and Processing*, 2003, no. 4, pp. 25–32 (in Russian).
9. Rybal'skii O. V., Solov'ev V. I., Zhuravel' V. V. Tracks of editing are in digital phonograms, excision and transposition of fragments executed by a method. *Regestratsiya, zberigannya i obrobka danykh = Data Recording, Storage and Processing*, 2016, no. 1, pp. 32–41 (in Russian).
10. Rybal'skii O. V., Solov'ev V. I., Zhuravel' V. V. Experimental verification of effect of change of fractal composition of signals at editing of phonogram the method of excision and transposition of fragments. *Suchasna spetsialna tekhnika* [Modern Special Technoqe], 2016, no. 3, pp. 75–85 (in Russian).
11. Rybal'skii O. V., Solov'ev V. I., Zhuravel' V. V. Basic requirements to the system of exposure of points of the digital editing in phonograms and methodology of her creation. *Informatica ta matematichi metody v modeluvanni = Informatics and Mathematical Methods in Simulation*, 2018, vol. 8, no. 3, pp. 232–237 (in Russian).

## Інфармацыя аб аўтарах

*Соловьев Виктор Иванович* – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой компьютерных систем и сетей, Восточноукраинский национальный университет им. В. Даля (пр. Центральный, 59а, 93400, Северодонецк, Украина). <https://orcid.org/0000-0003-3541-4740>. E-mail: edemsvi@gmail.com

*Рыбальский Олег Владимирович* – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры информационных технологий и кибербезопасности, Национальная академия внутренних дел (пл. Соломенская, 1, 03035, Киев, Украина). <https://orcid.org/0000-0002-1440-8344>. E-mail: rov\_1946@ukr.net

## Information about the authors

*Victor I. Solovyov* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy of Manager of the Department of the Computer Systems and Networks, V. Dal East Ukrainian National University (59a, Tsentralnyi Ave., 93400, Severodonetsk, Ukraine). <https://orcid.org/0000-0003-3541-4740>. E-mail: edemsvi@gmail.com

*Oleg V. Rybalskiy* – D. Sc. (Engineering), Professor, Professor of the Department of Information Technologies and Cybernetic Safety, National Academy of Internal Affairs (1, Solom'yanska Are., 03035, Kyiv, Ukraine). <https://orcid.org/0000-0002-1440-8344>. E-mail: rov\_1946@ukr.net

*Журавель Вадим Васильевич* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией исследований в сфере информационных технологий, Киевский научно-исследовательский экспертно-криминалистический центр Министерства внутренних дел Украины (ул. Владимирская, 15, 01001, Киев, Украина). E-mail: fonoscopia@ukr.net

*Железняк Владимир Кириллович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационной безопасности, Полоцкий государственный университет (ул. Блохина, 29, 211440, Новополоцк, Республика Беларусь). E-mail: v.zheleznyak@psu.by

*Vadym V. Zhuravel* – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory of Researches in the Field of Information Technologies, Kyiv Scientifically-Research Expertly-Criminalistics Center of the Ministry of Internal Affairs of Ukraine (15, Vladimirska Str., 01001, Kyiv, Ukraine). E-mail: fonoscopia@ukr.net

*Vladimir K. Zheleznyak* – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department of Informative Safety, Polotsk State University (29, Blokhin Str., 211440, Novopolotsk, Republic of Belarus). E-mail: v.zheleznyak@psu.by