

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2018. Т. 63, № 1

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2018. Т. 63, № 1

Журнал издается с января 1956 г.

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

Петр Александрович Витязь –

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

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

А. В. Белый – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

А. Ф. Ильющенко – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии,
Минск, Беларусь

Л. Г. Красневский – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь

- Е. И. Марукович** – Институт технологии металлов Национальной академии наук Беларуси, Могилев, Беларусь
Н. К. Мышкин – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Беларусь
О. Г. Пенязьков – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
Ю. М. Плескачевский – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
В. М. Федосюк – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь
М. Л. Хейфец – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
С. А. Чижик – Президиум 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** – Институт металловедения, оборудования и технологий «Академик Ангел Балевский» с Центром по гидро- и аэродинамике Болгарской академии 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 – Дунайско-Адриатическая Ассоциация по автоматизации и производству (ДАААМ), Венский технический университет, Вена, Австрия
В. В. Клубович – Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Беларусь
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. 119, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 284-19-19; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2018. Т. 63, № 1

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*

Компьютерная верстка *А. В. Новик*

Подписано в печать 21.03.2018. Выход в свет 27.03.2018. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 80 экз. Заказ 50.

Цена номера: индивидуальная подписка – 10,47 руб., ведомственная подписка – 25,45 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, 2018

PROCEEDINGS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2018, vol. 63, no. 1

The Journal has been published since January 1956

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

Pyotr A. Vityaz – 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

Aleksandr 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 – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Vitaliy G. Zalesky – Physical-Engineering Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Aleksandr F. Ilyuschenko – State Scientific and Production Amalgamation of Powder Metallurgy, Minsk, Belarus

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

Evgenii I. Marukovich – Institute of Technology of Metals of the National Academy of Sciences of Belarus, Mogilev, Belarus

Nikolai K. Myshkin – V. A. Bielyi Institute of Mechanics of Metal-Polymer Systems of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Belarus

Oleg G. Penyazkov – A. V. Lykov Institute of Heat and Mass Transfer of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Yury M. Pleskachevsky – Presidium 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. Kheifets – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

Sergey A. Chizhik – Presidium 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** – Institute of Metal Science, Equipment and Technologies “Acad. A. Balevski”
with Hydro- and Aerodynamics Centre of 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** – DAAAM International Vienna, TU Wien, Wien, Austria
- Vladimir V. Klubovich** – Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus,
Vitebsk, Belarus
- 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 119, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: + 375 17 284-19-19; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2018, vol. 63, no. 1

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

It is sent of the press 21.03.2018. Appearance 27.03.2018. Format 60×84 1/8. Offset paper. The press digital.

Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 80 copies. Order 50.

Number price: individual subscription – 10,47 byn., departmental subscription – 25,45 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, 2018

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Грабчиков С.С. Материалы электромагнитной и радиационной защиты для изделий электроники	7
Ковалевский А.А., Котов Д.А., Гранько С.В., Чернаусик О.М., Корзун К.А. Физико-химические свойства ультрадисперсных порошков кремния	15
Судник Л.В., Лученок А.Р., Козырева Ю.И., Ткачук В.С., Прихна Т.А., Козырев А.В. Ударно-волновое компактирование порошков	20
Ильющенко А.Ф., Петюшик Е.Е., Кривонос О.К. Модифицирование энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала циклическими нитраминами	27
Ловшенко Г.Ф. Наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов	34

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Качанов И.В., Власов В.В. Оптимизация режима нагружения при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий	43
Григорьев А.А. Приборы и методы исследований контактного взаимодействия твердых тел	53
Басинюк В.Л. Динамика переходных процессов в приводах с гибкой связью при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы алмазным кругом	68
Амельченко П.А., Дубовик Д.А., Ключников А.В., Ващула А.В. Современные тенденции сельхозтракторостроения	76

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Альхусан Халед, Ассад М.С., Пенязьков О.Г., Чернухо И.И. Термодинамическая эффективность детонационного двигателя	93
Мельников А.С., Попов Б.И. Прогнозирование основных характеристик графика продолжительности нагрузки при долгосрочной оптимизации энергосистем	101
Орловская В.И., Трифонов А.Г. Прогнозная оценка дозовых нагрузок на персонал типовой АЭС-2006 при проектных авариях с учетом инфраструктуры промплощадки	111

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Буй Куанг Гуи, Буй Доан Чанг, Горский Д.А., Золотой С.А., Нгуен Лан Ань, Нгуен Минь Нгок, Страшко И.Б., Хо Ву Туу Джан, Чу Ксан Гуи. Исследование возможности координации процессов съемки поверхности Земли космическими аппаратами VNREDSat-1 (Вьетнам) и БКА (Беларусь)	119
---	-----

CONTENTS

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

Grabchikov S. S. Materials of electromagnetic and radiation protection for electronic products	7
Kovalevskii A. A., Kotov D. A., Granko S. V., Chernausik O. M., Korzun K. A. Physico-chemical properties of ultradispersed powders of silicon	15
Sudnik L. V., Luchenok A. R., Kozyreva Yu. I., Tkachuk V. S., Prikhna T. A., Kozyrev A. V. Shock-wave compacting of powders	20
Ilyushchanka A. Ph., Piatsiushyk Ya. Ya., Kryvanos A. K. Modification of the energy-saturated heterogeneous composite material by cyclic nitramines	27
Lovshenko G. F. Nanostructural mechanically alloyed dispersion strengthened materials based on metals	34

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

Kachanov I. V., Vlasov V. V. Loading regime optimization for high-speed impact extrusion of bimetallic flat-step rod products	43
Grigoriev A. Ya. Devices and methods of investigation of contact interaction of solids	53
Basiniuk U. L. Dynamics of transition processes in drive mechanism with flexible communication at wafer separation by a diamond wheel	68
Amelchenko P. A., Doubovik D. A., Klyuchnikov A. V., Vaschula A. V. Modern tendencies of agricultural tractors	76

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

Khaled Alhussan, Assad M. S., Penyazkov O. G., Chernuho I. I. Thermodynamical efficiency of a detonation engine	93
Melnikov A. S., Popov B. I. Forecasting the load duration curves for long-term optimization of energy systems	101
Orlovskaya V. I., Trifonov A. G. Dose assessment for typical NPP-2006 staff for design basis accident taking into account site infrastructure	111

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Bui Quang Huy, Bui Doan Cuong, Gorski D. A., Zolotoy S. A., Nguyen Lan Anh, Nguyen Minh Ngoc, Strashko I. B., Hồ Vũ Thu Giang, Chu Xuan Huy. Study on process coordination capability for Earth surface imaging VIA VNREDSat-1 of Vietnam and BKA of Belarus	119
---	-----

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 517.958;537.9;537.868.4;538.975

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

С. С. Грабчиков

Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

МАТЕРИАЛЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ И РАДИАЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ ДЛЯ ИЗДЕЛИЙ ЭЛЕКТРОНИКИ

Аннотация. Электромагнитные (ЭМИ) и ионизирующие (ИИ) излучения являются одними из основных дестабилизирующих факторов, воздействующих на функциональное оборудование ракетно-космических, авиационных и наземных комплексов. В связи с этим направление физического материаловедения, связанное с созданием новых материалов и технологий для высокоэффективной электромагнитной и радиационной защиты, является актуальным. В Научно-практическом центре Национальной академии наук Беларуси по материаловедению разработаны новые материалы и технологические процессы формирования электромагнитной и радиационной защиты на корпусах приборов и элементов широкого спектра назначения.

Наиболее сложными вариантами для защиты от ЭМИ являются постоянное магнитное поле и мощный электромагнитный импульс. Перспективные материалы для решения данной проблемы – многослойные пленочные структуры симметричного и градиентного типов. В связи с этим рассмотрены экспериментальные результаты по исследованию эффективности электромагнитных экранов на основе структур системы (Fe–Co–Ni)/Cu в постоянном магнитном поле, низкочастотном и импульсном ЭМИ. Показано, что при выборе материалов для магнитоэлектронных экранов следует учитывать как основные магнитные характеристики, так и роль неоднородности магнитного поля в объеме экрана и нелинейность магнитной проницаемости. Сделан вывод о высокой эффективности ослабления градиентными структурами импульсных магнитных полей микросекундной длительности, составляющих 58÷40 дБ при значениях напряженностей магнитных полей 1,25÷12,0 кА/м соответственно.

Для защиты электронных компонентов и интегральных микросхем от воздействия ИИ предложен композиционный материал на основе системы вольфрам–медь. Показано, что радиационные экраны, изготовленные на его основе, эффективно защищают от электронного и протонного излучений с энергиями до 2 МэВ и до 500 МэВ соответственно. Приведены результаты практического применения разработанных материалов и технологий.

Ключевые слова: электромагнитные и ионизирующие излучения, электромагнитная и радиационная защита, магнитные и композиционные материалы, электронные компоненты

Для цитирования: Грабчиков, С. С. Материалы электромагнитной и радиационной защиты для изделий электроники / С. С. Грабчиков // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 7–14.

S.S. Grabchikov

Scientific and Practical Materials Research Centre of the National Academy of Belarus, Minsk, Belarus

MATERIALS OF ELECTROMAGNETIC AND RADIATION PROTECTION FOR ELECTRONIC PRODUCTS

Abstract. Electromagnetic (EMR) and ionizing (IR) radiation are one of the main destabilizing factors which affect functional equipment of space-rocket, aviation and ground-based complexes. Therefore, the direction of physical materials science, associated with the development of new materials and technologies for high-efficiency electromagnetic and radiation protection is of current interest. In the Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus new materials and technological processes for the formation of electromagnetic and radiation protection of the devices packages and elements of a wide range of purposes have been developed.

A constant magnetic field and a powerful electromagnetic pulse are the most difficult variants for protection against EMR. Symmetric and gradient multilayer film structures are the promising materials for solving this problem. Thus, experimental results on the investigation of the efficiency of electromagnetic shields based on the structures of the system (Fe–Co–Ni)/Cu in a constant magnetic field, low-frequency and pulsed EMR are considered. It is shown that while choosing materials for magnetostatic shields, the main magnetic characteristics and the role of the inhomogeneity of the magnetic field in the shield volume and the nonlinearity of the magnetic permeability should be considered. It is concluded about the high efficiency of attenuation of microsecond duration pulsed magnetic fields by the gradient structures, which are 58–40 dB at the magnetic field strengths of 1.25–12.0 kA/m, respectively.

A composite material based on the tungsten-copper system is proposed for electronic components and integrated circuits protection from the effects of IR. It is demonstrated that radiation shields based on it provide the effective protection against electron- and proton radiation with energies up to 2 MeV and up to 500 MeV, respectively. The practical application results of developed materials and technologies are given.

Keywords: electromagnetic and ionizing irradiation, electromagnetic and radiation protection, magnetic and composite materials, electronic components

For citation. Grabchikov S.S. Materials of electromagnetic and radiation protection for electronic products. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 7–14 (in Russian).

Введение. Электромагнитные (ЭМИ) и ионизирующие (ИИ) излучения являются одними из основных дестабилизирующих факторов, воздействующих на элементы, блоки и аппаратуру ракетно-космических, авиационных и наземных комплексов в изделиях двойного и специального назначения. Эти излучения представляют серьезную угрозу для надежной и стабильной работы оборудования в течение всего срока активного существования (САС) [1].

Источниками ЭМИ могут являться как естественные (солнечное космическое и галактическое космическое излучения, магнитосфера Земли, атмосферные явления), так и искусственные (радиопередающая и электронная аппаратура, нештатные ситуации в системах энергообеспечения) объекты. При этом, с одной стороны, в результате бурного развития электротехнической, радиоэлектронной, информационной и военной техники в последние годы значительно повысился уровень электромагнитного фона, расширился диапазон используемых частот ЭМИ, возросла их амплитуда. С другой стороны, совершенствование бортовой радиоэлектронной и информационной техники, исследовательских и интеллектуальных комплексов происходит в направлении минимизации массы и габаритов, увеличения плотности компоновки. Все это значительно осложняет проблему формирования электромагнитной обстановки, обеспечивающей нормальное функционирование и электромагнитную совместимость (ЭМС) бортовых комплексов и аппаратуры.

Еще одна, не менее важная проблема связана с обеспечением эксплуатационной надежности изделий двойного и специального назначения в условиях повышенного уровня радиационных воздействий. Потоки заряженных частиц космического пространства (КП) (электроны, протоны, тяжелые заряженные частицы и т. д.), а также излучения, возникающие при работе атомных реакторов, ускорителей заряженных частиц и др., являются одной из основных причин нарушения работоспособности технических систем [2]. Существует несколько путей повышения радиационной стойкости [3]: применение специализированных технологических процессов и материалов на этапе изготовления бортовой аппаратуры и интегральных микросхем (ИМС), конструкционная защита из материалов на основе алюминия, метод мажоритирования и др. Во многих случаях данные методы защиты недостаточны и радиационные воздействия все еще высоки, поэтому для наиболее уязвимых элементов ракетно-космической аппаратуры следует использовать дополнительную радиационную защиту.

В связи с этим ясна актуальность направления, связанного с разработкой новых материалов и технологий для эффективной электромагнитной и радиационной защиты. При этом временные, финансовые и материальные затраты на выполнение данных работ несопоставимы с издержками и потерями, возникающими при эксплуатации ракетно-космических, авиационных и наземных комплексов.

Электромагнитная защита. Основным и наиболее эффективным способом защиты от ЭМИ является экранирование. Традиционные методы экранирования с помощью массивных листовых и ленточных материалов на основе железа и его сплавов во многих случаях позволяют ре-

шить проблему электромагнитной защиты, однако это дорогостоящий, технологически сложный и материалоемкий путь. Один из наиболее перспективных способов экранирования – это применение многослойных экранов. В этих экранах, состоящих из металлов с различными волновыми сопротивлениями, за счет многократного отражения электромагнитной волны между слоями эффективность экранирования возрастает [4].

В Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению разработан новый способ формирования многослойных пленочных экранов (МПЭ) симметричного и градиентного типов, содержащих чередующиеся слои на основе сплавов Ni–Fe с высокой магнитной проницаемостью (μ) или с высокой индукцией насыщения (B_s), слои меди с высокой электропроводностью (σ) (Патент Республики Беларусь № 11843 от 28.01.2009 «Многослойный электромагнитный экран»; Патент на изобретение РФ № 2474890 от 10.02.2013 г. «Многослойный электромагнитный экран для защиты фотоэлектронных умножителей и способ его нанесения»). Он позволяет в едином технологическом цикле наносить МПЭ на различные корпуса и изделия сложной геометрической формы, варьировать в широких диапазонах толщину и количество отдельных слоев. Экспериментальные образцы магнитных экранов системы (Ni–Fe)/Cu характеризовались следующими параметрами: толщина (d_{NiFe}) и количество (N_{NiFe}) магнитных слоев, толщина (d_{Cu}) и количество (N_{Cu}) медных слоев, суммарная толщина магнитных слоев (Σd_{NiFe}) и суммарная толщина МПЭ (Σd).

Оценка эффективности экранирования (\mathcal{E}) проводилась по формуле

$$\mathcal{E} = H_{\text{внешн.}}/H_{\text{внутр.}}, \quad (1)$$

а оценка эффективности экранирования (A , дБ) – по формуле

$$A = 20 \lg(H_{\text{внешн.}}/H_{\text{внутр.}}), \quad (2)$$

где $H_{\text{внешн.}}$ – напряженность внешнего магнитного поля; $H_{\text{внутр.}}$ – напряженность магнитного поля, прошедшего через экран.

Защита от магнитостатических полей. Наиболее сложным случаем защиты от воздействия внешних ЭМИ является случай экранирования статических магнитных полей [5]. Как правило, при рассмотрении магнитостатического экранирования исходят из принципа шунтирования магнитного поля ферромагнитным материалом [6]. Основная суть данного принципа заключается в замыкании силовых линий через материал с низким сопротивлением магнитному потоку, из чего следует, что эффективность экранирования прямо пропорциональна значениям магнитной проницаемости (μ) материала экрана и обратно пропорциональна площади его поперечного сечения. Однако ранее нами было показано [7], что ряд экспериментальных результатов по магнитостатическому экранированию не согласуется с положениями принципа шунтирования. Подобные результаты эксперимента связаны с нелинейным характером изменения магнитной проницаемости по толщине экрана. Данная нелинейность может быть представлена следующим образом: в то время как внешний магнитный слой экрана под действием $H_{\text{внешн.}}$ находится в состоянии $\mu(H_{\text{внешн.}})$, внутренние слои по мере проникновения вглубь экрана находятся под действием более слабых магнитных полей со значениями $H_{\text{внешн.}} < H_1 < H_2 < H_3 < H_4 < \dots < H_{\text{внутр.}}$, где H_1, H_2, H_3, H_4 – напряженности магнитного поля в экране при сканировании от внешней стороны к внутренней. Тогда внутренний слой экрана будет находиться в состоянии $\mu(H_{\text{внутр.}})$.

Другая важная особенность магнитостатического экранирования – отличие топологий магнитных полей для случая магнитопровода с витками тока (рис. 1, *a*) и случая цилиндрического экрана (рис. 1, *b*). В первом случае во всем объеме магнитопровода индуцируется однородное замкнутое магнитное поле и значение μ можно считать постоянным. Во втором случае направление силовых линий магнитного поля носит незамкнутый характер, то есть значение μ не является постоянными в объеме материала экрана. Поэтому использовать магнитные характеристики, определенные на замкнутых образцах, не всегда корректно для оценки параметров эффективности магнитостатического экранирования.

Для подтверждения роли этого отличия приведем экспериментальные результаты зависимостей $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$, полученные при исследовании экранов из промышленной аморфной ленты 84КХСР и электролитического сплава Ni₈₀Fe₂₀ (рис. 2) [7]. В области магнитных полей от 15 до

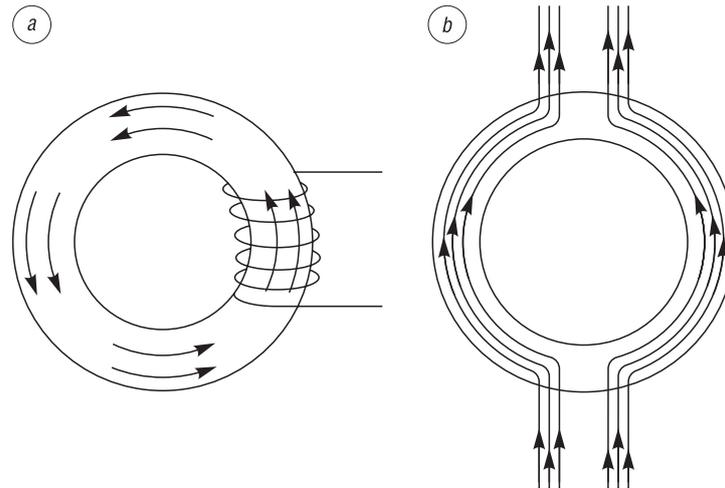


Рис. 1. Топологии магнитных полей для случаев магнитопровода с витками тока (a) и цилиндрического экрана (b)
 Fig. 1. The topologies of magnetic fields for magnetic guide with current loops (a) and a cylindrical shield (b)

135 А/м эффективность экрана из ленты 84КХСР выше, чем экрана из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. В интервале от 135 до 2700 А/м экраны на основе сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ более предпочтительны, несмотря на то, что по значениям μ они существенно уступают экранам на основе аморфной ленты 84КХСР. Из данного эксперимента следует, что области эффективного экранирования у разных материалов существенно различаются. При этом необходимо отметить, что в аморфных сплавах 84КХСР максимальная магнитная проницаемость достигается в области магнитных полей ниже, чем 1 А/м, однако их высокая эффективность экранирования реализуется в интервале магнитных полей от 15 до 135 А/м (рис. 2). Для экрана из электролитического сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ максимальная магнитная проницаемость достигается в области магнитных полей 60–80 А/м, а максимальная эффективность экранирования – 800–2000 А/м. Исходя из приведенных результатов можно сделать следующий вывод, что при подборе материалов для магнитоэкранных устройств следует учитывать как основные магнитные характеристики, так и роль неоднородности магнитного поля в объеме материала экрана и связанную с этим нелинейность магнитной проницаемости.

Одним из примеров успешного применения технологии МПЭ является совместная с НИЯУ МИФИ (Москва, Россия) работа по защите научных приборов от воздействия постоянных

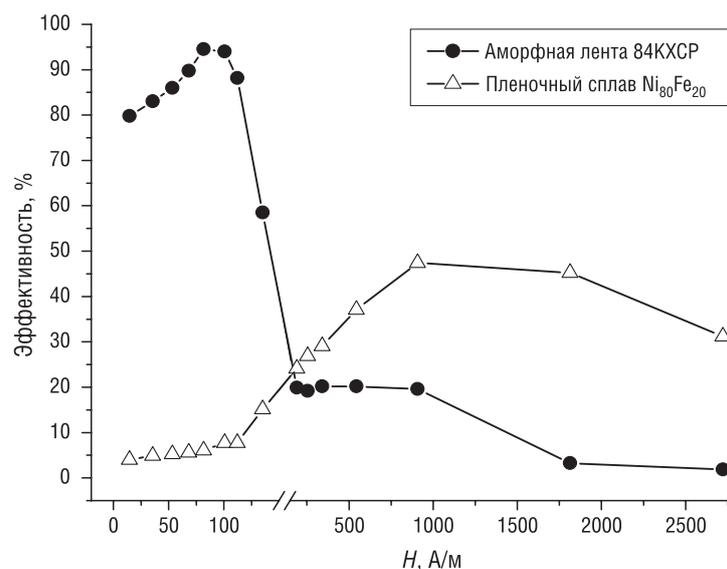


Рис. 2. Зависимости эффективности экранов на основе электроосажденного сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и аморфной ленты 84КХСР от напряженности магнитного поля

Fig. 2. Field dependences of the shields efficiency based on electrodeposited $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloy and amorphous 84KHSSR tape

магнітных і нізкочастотных электрамагнітных палей (праграма Саюзнага государства «Нанотэхналогія-СГ»). Як вядома [8], пры рабоце в акалоземном прастранстве бортовая ракетна-касмическая і авіацыйная апаратура падвергаецца ўздзеянню знешніх пастаянных магнітных і перемных электрамагнітных палей. Так, максімальная індукцыя пастаяннага магнітнага паля ўздоў орбіты станцыі «МІР» дасягае 0,06 мТл, а яе варыяцыі – 0,04 мТл. Эты палы негатыўна ўплываюць на работу фотэлектронных умножыцелей (ФЭУ) і дрыхіх прыбораў, прынцып дзейства котрых аснован на рэгістрацыі дрыхжущыхся зарыженных частыц, што в сваю ачередь прыводыць к снжыенню значенных каэффцыента усаленныя і іскажыенню палезнага сыгнала. Прымененне экранов на основе МПЭ пазволыло полностью усраныть влныяне слабых магнітных палей с індукцыей до 0,5 мТл на работу ФЭУ і снзыть іх въздзействне на амплытудное разрешенне імпульсов [9].

Защита от переменных электрамагнітных палей. В случае экранырования перемных ЭМІ наряду с механызмом шунтырования магнітнот составляющей начынает работатъ второй механызм, аснованный на вытесненны перемного магнітнот паля помех магнітнот полем вхревых токов, так называемый поверхностный эффект (скын-эффект) [6]. Также необходимо учытывать вклад отражыенныя электрамагнітнот волны на гранацах раздела двух сред. Роль этого эффекта особливо велыка пры іспользованы многослойных металлыческих экранов [4]. Таким образом, суммарный эффект опредыляется следующымн механызмамы – шунтырованием, поверхностным эффектом і отражыеннем.

Для эксперымента іспользованы тры образца МПЭ с пастаяннымн значенныма $\Sigma d_{\text{NiFe}} = 400$ мкм, содержашых 40 слоев $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 10 мкм, 10 слоев $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 40 мкм і два слоя $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 200 мкм. Толшына разделытельных медных слоев $d_{\text{Cu}} = 2$ мкм. Измеренныя эффктывносты экранырования показаны, что с ростом частоты ЭМІ в областы частот 50 Гц і выше отчетлыво наблыдается эффект «многослойносты», выражыенный в рязком увелыченны значенны Э для экранов с большым колычеством N_{NiFe} і N_{Cu} слоев. Так, с ростом N_{NiFe} от 2 до 40 пры $\Sigma d_{\text{NiFe}} = 400$ мкм значенны Э възрастают в 1,9; 3,2 і 17,7 раз для частот 50, 500 і 5000 Гц соотвetsyтвенно.

Прымером успешного прымененны МПЭ для экранырования ЭМІ может служыть работа, выполненныя Научно-пратыческим центром НАН Беларусы по матерыаловеденны совместно с Інстытутом космическых ісследований РАН (Москва, Россыя) (праграма Саюзнаго государства «Космос-НТ»). Перед разработчыкамы стояла задача обеспеченны ЭМС бортовых блоков космическот апарата (КА), содержашых лныейный шаговой двыгатель (ЛШД), блок электроники і оптыческую систему. Проблема состоыла в том, что асновным прыбором научного комплекса КА являлся высокоточный магнітометр, поэтому КА должен бытъ «магніточыстым». Вместе с тем магнітометр размещен на расстоыанны 0,7 м от прыводов сканырующей системы і датчыков положыенны, содержашых ЛШД, которые в сваю ачередь індуцырованы помехы. Прыбор необходимо было экраныровать. Однако согласоватъ требованы по массогабарытным параметрам с технологыей ізготовленны экранов із традыцыйных массивных матерыалов не предыставлялось възможным. По нашей технологыей на стандартных корпусах бортовых прыборов былы сформырованы МПЭ. Прыемочныя іспытанны показаны, что в дыапазоне частот от 100 Гц до 10 МГц пры вклученны ЛШД уровень паразытных электрамагнітных помех възрастал на 30÷50 дБ по сравненны с фоновым режымом, а іспользованы МПЭ пазволыло без какых-лыбо конструкторных доработок полностью убратъ наводкы, генерыруемые ЛШД, і тем самым обеспечыть «магніточыстые» условия эксплыуатаны.

Защита от імпульсных электрамагнітных палей. Еще одным очень сложным случаем защиты радыоэлектронной апаратуры от ЭМІ является мощны электрамагнітны імпульс. Поражашее действне электрамагнітнот імпульса обусловлено індуцырованныма токымамы в проводныках і полупроводныках, а также пробоем дыэлектрических компонентов [10]. Согласно требованы обеспеченны электрамагнітнот стойкосты і безопасной эксплыуатаны, электронная і радыоэлектронная апаратура должна надежно работатъ в условиях действа знешніх поражашых факторов (короткое замыканы лныей электропередач, рязряд молны і др.). Эффктывнымн средствами защиты от мощного ЭМІ могут являться МПЭ. Совместно с ОАО «Корпорация МІТ» (Москва, Россыя) было ізучено влныяне тыпа і внутреннего строенны МПЭ на эффктывносты экранырования імпульсного ізлученны мкросекундного дыапазона

частот [11]. Измерения проводились на трех замкнутых цилиндрических образцах: медь с толщиной стенок 2 мм (№1); МПЭ симметричного типа (№2), содержащий 30 магнитных слоев сплава $Ni_{80}Fe_{20}$ толщиной по 10 мкм и 30 слоев Cu толщиной по 2 мкм; а также образец МПЭ градиентного типа (№3), содержащий 15 магнитных слоев сплава $Ni_{80}Fe_{20}$ и 15 магнитных слоев сплава $Ni_{50}Fe_{50}$ толщиной по 10 мкм, 30 слоев Cu толщиной по 2 мкм.

Как видно из рис. 3, эффективность экранирования импульсных магнитных полей микросекундного диапазона в интервале напряженностей от 1,25 до 12,0 кА/м достигает $58 \div 40$ дБ соответственно и зависит от внутреннего строения МПЭ. Экраны градиентного типа обладают более высокой (на $8 \div 10$ дБ) эффективностью по сравнению с экранами симметричного типа. Эффект насыщения ферромагнитных слоев существенно сказывается на эффективности экранирования импульсных магнитных полей микросекундного диапазона. Насыщение ферромагнитных слоев МПЭ наблюдается в области 11 кА/м, что существенно превышает максимальные значения напряженности магнитного поля грозового происхождения $H_{max} = 3$ кА/м. Эффективность защиты от импульсного воздействия конструкциями из меди (№1) невысока и составляет 30 дБ во всем исследованном интервале магнитных полей.

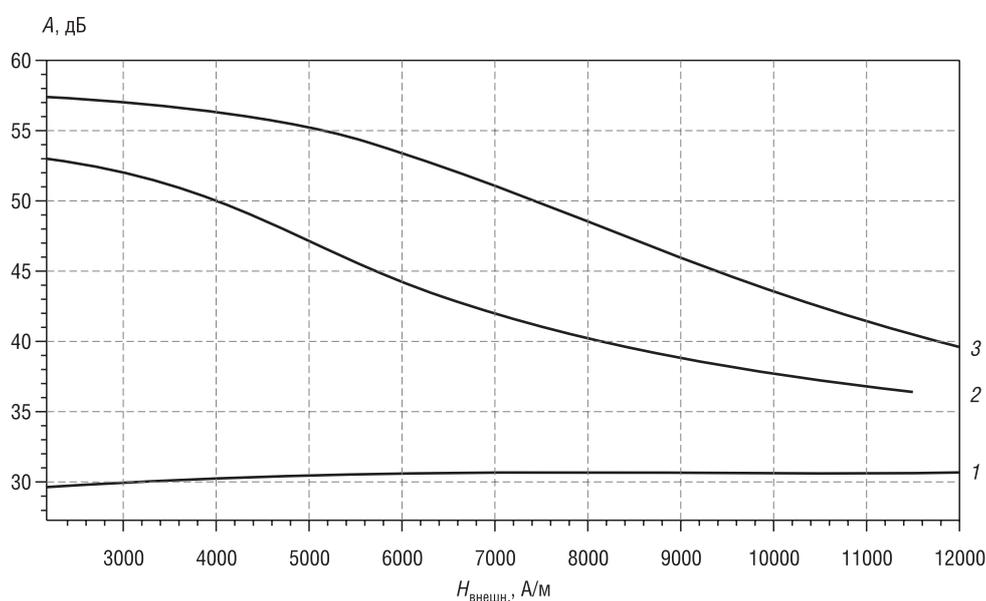


Рис. 3. Зависимости эффективности экранирования опытных образцов от напряженности импульсного электромагнитного поля: 1 – медный цилиндр без МПЭ, 2 – медный цилиндр с МПЭ симметричного типа, 3 – медный цилиндр с МПЭ градиентного типа

Fig. 3. Strength dependences of the pulsed electromagnetic fields shielding of prototypes: 1 – copper cylinder without shield, 2 – copper cylinder with shield of gradient type, 3 – copper cylinder with shield of symmetrical type

Защита от ионизирующих излучений. При использовании стандартных материалов конструкционной защиты КА уровни радиационных воздействий оказываются достаточно высокими. Необратимые изменения в полупроводниковых приборах и ИМС происходят при значениях поглощенных доз радиации $D \geq 10^5 \div 10^6$ рад и $D \geq 10^4 \div 10^5$ рад соответственно. Такие уровни радиационной стойкости элементной базы не обеспечивают требуемого САС КА даже при работе в условиях ряда околоземных орбит, не говоря уже о полетах на другие планеты Солнечной системы. Поэтому для наиболее критичных узлов и элементов аппаратуры необходимо использовать радиационную локальную защиту (РЛЗ).

Из общих представлений о взаимодействии ионизирующих излучений с веществом следует, что материал, эффективный для защиты электронных компонентов и ИМС от воздействия электронов и протонов КП, должен иметь композиционную структуру, а химический состав – содержать элементы с большим порядковым номером. Материалы РЛЗ также должны обеспечивать технологическую совместимость с материалами, используемыми для сборки изделий

микроэлектроники. Учитывая данные требования, в качестве материала для синтеза образцов РЛЗ нами были выбраны композиты системы W–Cu.

На их основе в Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению совместно с ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» разработаны и изготовлены экраны РЛЗ для металлокерамических корпусов ИМС (рис. 4). Проведенные на серийных ИМС ППЗУ 1632РТ 1Т (перепрограммируемые запоминающие устройства) испытания показали, что РЛЗ на основе композитов W–Cu толщиной 1,2÷1,5 мм обеспечивает снижение радиационной нагрузки по электронам с энергией 1,6÷1,8 МэВ в 145÷155 раз, по протонам с энергией от 0,04 до 500 МэВ – в 6 раз.

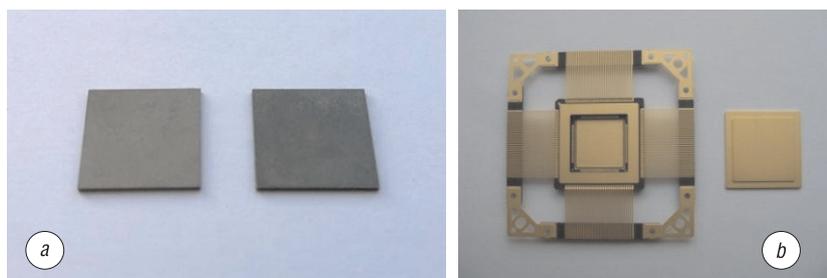


Рис. 4. Синтезированные образцы композиционного материала W–Cu (a), металлокерамический 144 выводной корпус ИМС с экранами РЛЗ (b)

Fig. 4. Samples based on W–Cu composite material (a), metal-ceramic 144 lead-out IC package with shields (b)

Выводы. В Научно-практическом центре НАН Беларуси по материаловедению разработаны новые материалы и технологии для защиты электронных и радиоэлектронных компонентов от широкого спектра ЭМИ и ИИ.

Технологический процесс формирования МПЭ позволяет на стандартных корпусах и блоках аппаратуры широкого спектра назначения формировать электромагнитные экраны, обеспечивающие электромагнитную совместимость и высокоэффективное экранирование и обладающие высокой прочностью сцепления с корпусом, а также низкими массогабаритными параметрами.

Экраны радиационной локальной защиты на основе композиционных материалов эффективно защищают от воздействия электронного и протонного излучений с энергиями до 2 МэВ и до 500 МэВ соответственно. Они позволяют обеспечить повышенную радиационную стойкость ИМС и электронных компонентов, снизить затраты на комплектацию при производстве космической аппаратуры, уменьшить ее весовые и габаритные параметры.

Список использованных источников

1. Кечиев, Л. Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, П. В. Степанов. – М.: Группа ИТД, 2010. – 470 с.
2. Модель космоса / под ред. М. И. Панасюка. – М.: Изд-во КДУ, 2007. – Т. 1. – 872 с.
3. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г. Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
4. Шапиро, Д. Н. Основы теории электромагнитного экранирования / Д. Н. Шапиро. – Л.: Энергия, 1975. – 112 с.
5. Гроднев, И. И. Электромагнитное экранирование в широком диапазоне частот / И. И. Гроднев. – М.: Связь, 1972. – 112 с.
6. Чернушенко, А. М. Конструкции СВЧ устройств и экранов / А. М. Чернушенко. – М.: Радио и связь, 1983. – 400 с.
7. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells / S. S. Grabchikov [et. al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2016. – Vol. 398. – P. 49–53.
8. Применение многослойных пленочных экранов в бортовых космофизических спектрометрах / А. Г. Батищев [и др.] // Ядерная физика и инжиниринг. – 2012. – Т. 3, № 5. – С. 1–8.
9. Перспективы использования многослойных пленочных экранов для защиты космической аппаратуры от постоянных магнитных полей / В. В. Дмитренко [и др.] // Краткие сообщения по физике ФИАН. – 2015. – № 5. – С. 43–48.
10. Балюк, Н. И. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н. И. Балюк, Л. Н. Кечиев, П. В. Степанов. – М.: ООО «Группа ИДТ», 2008. – 478 с.
11. Многослойные пленочные экраны как средства защиты радиоэлектронной аппаратуры от воздействия импульсных электромагнитных полей / С. А. Акимов [и др.] // Технологии ЭМС. – 2017. – № 1 (60). – С. 21–30.

References

1. Kechiev L. N., Akbashev B. B., Stepanov P. V. *Shielding of technical facilities and shielding systems*. Moscow, Gruppya ITD Publ., 2010. 470 p. (in Russian).
2. Panasyuk M. I. (ed.) *Space model. Volume 1*. Moscow, KDU Publ., 2007. 872 p. (in Russian).
3. Raikunov G. G. (ed.) *Ionizing radiation of outer space and their impact on the spaceborne apparatus of space vehicles*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 256 p. (in Russian).
4. Shapiro D. N. *The fundamentals of the theory of electromagnetic shielding*. Leningrad, Energiya Publ., 1975. 112 p. (in Russian).
5. Grodnev I. I. *Electromagnetic shielding in a wide frequency range*. Moscow, Svyaz' Publ., 1972. 112 p. (in Russian).
6. Chernushenko A. M. *Design of microwave devices and shields*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1983. 400 p. (in Russian).
7. Grabchikov S. S., Trukhanov A. V., Trukhanov S. V., Kazakevich I. S., Solobay A. A., Erofeenko V. T., Vasilenkov N. A., Volkova O. S., Shakin A. Effectiveness of the magnetostatic shielding by the cylindrical shells. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 398, pp. 49–53. DOI: 10.1016/j.jmmm.2015.08.122
8. Batishchev A. G., Gal'per A. M., Dmitrenko V. V., Zamesov A. Yu., Naumov P. Yu., Grabchikov S. S., Sosnovskaya L. B., Cheledyuk A. V., Sharapa T. E., Grishin S. A., Petyuk A. L. The application of multilayer film shields in on-board cosmophysical spectrometers. *Yadernaya fizika i inzhiniring = Nuclear Physics and Engineering*, 2012, vol. 3, no. 5, pp. 1–8 (in Russian).
9. Dmitrenko V. V., N'yunt P. V., Vlasik K. F., Grachev V. M., Grabchikov S. S., Murav'ev-Smirnov S. S., Novikov A. S., Petrenko D. B., Ulin S. E., Uteshev Z. M., Chernysheva I. V., Shustov A. E. The application prospects of multilayer film shields for space equipment protection against constant magnetic fields. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2015, vol. 42, iss. 5, pp. 148–151. DOI: 10.3103/S1068335615050061
10. Balyuk N. I., Kechiev L. N., Stepanov P. V. *A powerful electromagnetic pulse: the impact on electronic means and protection methods*. Moscow, Gruppya ITD Publ., 2008. 478 p. (in Russian).
11. Akimov S. A., Vasilenkov N. A., Grabchikov S. S., Maksimov A. Yu., Simakov S. F., Trukhanov A. V. Multilayer film shields as a means of protecting electronic equipment from the pulsed electromagnetic fields impact. *Tekhnologii elektromagnitnoi sovmestimosti = Technologies of Electromagnetic Compatibility*, 2017, no. 1 (60), pp. 21–30 (in Russian).

Информация об авторе

Грабчиков Сергей Степанович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

Information about the author

Sergey S. Grabchikov – D. Sc (Physics and Mathematics), Chief Researcher at Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gss@ifftp.bas-net.by

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 541.1+541.451:546;631.832

Поступила в редакцию 31.07.2017

Received 31.07.2017

А. А. Ковалевский, Д. А. Котов, С. В. Гранько, О. М. Чернаусик, К. А. Корзун*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь***ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ КРЕМНИЯ**

Аннотация. Проведены экспериментальные исследования ультрадисперсного порошка кремния, полученного путем помола полупроводникового монокристаллического кремния, изучен процесс масштабирования порошков с использованием механохимического измельчения. Установлено, что размерность кристаллитов порошков кремния определяет их физико-химические свойства. Ультрадисперсные порошки кремния с размером частиц ≤ 10 нм легко разлагают воду при комнатной температуре на водород и кислород, они легко окисляются кислородом воздуха и активно взаимодействуют с гидроксидами и кислотами с выделением значительного количества тепла. Скорость насыщения микро- и ультрадисперсных порошков водородом при постоянной скорости потока в проточной системе зависит от температуры процесса гидрирования водорода. Установлено, что гидрид, образующийся при низкой температуре (≤ 573 К) находится в равновесном состоянии при гидрировании в проточном реакторе. С прекращением термического воздействия после гидрирования обработанный порошок переходит в метастабильное состояние. Водород, поступающий в объем микро- и ультрадисперсного порошка кремния в диапазоне температур 373–723 К за счет диффузионного процесса, может реагировать не только с атомами кремния с образованием гидридов типа SiH_2 , но и с гидридами менее активных радикалов типа Si_2H_4 , Si_2H_6 . Процесс гидрирования имеет две явно выраженные стадии. Показано, что температура перехода между стадиями определяется дисперсностью микро- и ультрадисперсных порошков кремния и структурой гидридов на поверхности частиц. В итоге установлено, что за оптимальную температуру гидрирования следует принять температуру 623 К, при которой достигается максимальная подвижность атомов кремния при формировании гидрида. При температуре выше 723 К для гидрида Si_2H_4 (SiH_2) наблюдается резкое уменьшение содержания водорода.

Ключевые слова: теплота сгорания, гидрирование, ультрадисперсные порошки кремния, механическое измельчение

Для цитирования: Физико-химические свойства ультрадисперсных порошков кремния / А. А. Ковалевский [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 15–19.

A. A. Kovalevskii, D. A. Kotov, S. V. Granko, O. M. Chernausik, K. A. Korzun*Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus***PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF ULTRADISPERSED POWDERS OF SILICON**

Abstract. Experimental investigations of ultradispersed silicon powder produced by mechanical grinding are conducted. The process of scaling powders using mechanochemical grinding was studied. It was found that the dimension of crystallites of the silicon powder determines their physical and chemical properties. Finely divided powders of silicon with a particle size ≤ 10 nm easily decompose water at room temperature into hydrogen and oxygen, they are easily oxidized by air oxygen and actively interact with hydroxides and acids with the release of significant amount of heat. The rate of saturation of micro- and ultradispersed powders with hydrogen at a constant rate of flow in the flow system depends on the temperature of the hydrogen hydrogenation process. It was found that the hydride formed at a low temperature (≤ 573 K) is in an equilibrium state when it is being hydrogenated in a flow reactor. The treated powder passes into a metastable state with the termination of the thermal action after hydrogenation. Hydrogen, entering the volume of micro- and ultradispersed silicon powder in the temperature range 373–723 K due to the diffusion process, can react not only with silicon atoms to form hydrides of the SiH_2 type, but also with hydrides of less active radicals of the type of Si_2H_4 , Si_2H_6 . The hydrogenation process has two distinct stages. It is shown that the temperature of the transition between the stages is determined by the dispersion of micro- and ultradispersed silicon powders and by the structure of hydrides on the particle surface. As a result, it is established that the optimum temperature of hydrogenation should be taken at a temperature of 623 K, at which the maximum mobility of silicon atoms is reached during the formation of hydride. Sharp decrease in the hydrogen content is observed at a temperature above 723 K for the Si_2H_4 (SiH_2).

Keywords: heat of combustion, hydrogenation, ultradispersed silicon powders, mechanical grinding

For citation. Kovalevskii A. A., Kotov D. A., Granko S. V., Chernausik O. M., Korzun K. A. Physico-chemical properties of ultradispersed powders of silicon. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 15–19 (in Russian).

Введение. Проблема получения и использования ультрадисперсных порошков привлекает большое внимание в связи с потребностями порошковой металлургии, производства керамических материалов и наноматериалов, а также термиков.

Микро- и ультрадисперсные порошки ряда элементов (Al, W, Fe, Ti, V, Si и др.) обладают уникальным комплектом физико-технических характеристик [1–5]. Реализация потенциальных возможностей этих порошков может обеспечить значительный экономический эффект, однако широкое их применение сдерживается в основном из-за отсутствия эффективных технологий производства недорогих, качественных и высокодисперсных порошков. Особую актуальность приобретают вопросы, связанные с поиском и применением порошков, по структуре и составу удовлетворяющим нескольким направлениям их использования.

Микро- и ультрадисперсные порошки металлов и неметаллов вводятся в состав гетерогенных конденсированных систем, используемых в качестве твердых топлив в двигателях ракетно-космических комплексов, газогенераторах, системах пожаротушения и других технических устройствах, в качестве металлического горючего, а также как инициаторы процесса горения [4, 5]. Основными характеристиками и требованиями являются химический и гранулометрический состав, а также структура частиц порошка.

Методика исследований. Изучались ультрадисперсные порошки кремния, полученные путем помола полупроводникового монокристаллического кремния КЭФ-20 и КДБ-10 в планетарно-шаровой мельнице РМ-100.

Исследуемые образцы порошков фракционировали по размеру частиц путем седиментации в петролейном эфире. Использовался метод установившейся скорости седиментации, причем искомые величины найдены по изменению скорости накопления осадка, плотности столба суспензии (эмульсии), концентрации частиц на определенном уровне и т. д. Седиментацию для высокодисперсных систем с размером частиц менее 1 мкм (которые в обычных условиях седиментационно устойчивы) проводили в поле центробежных сил. В этом случае применение центрифуг позволяет снизить предел разделения до 0,1 мкм.

Использовали метод дифференциального центрифугирования, который основан на различиях в скоростях седиментации частиц, отличающихся друг от друга размерами и плотностью. При этом разделяемый материал центрифугировался при ступенчатом увеличении центробежного ускорения, которое выбиралось так, чтобы на каждом этапе на дно сосуда для фракционирования осаждалась определенная фракция. В конце каждой стадии осадок отделялся от надосадочной жидкости и несколько раз промывался с целью получения в итоге чистой осадочной фракции.

Фазовый состав определяли в результате рентгеновского анализа на установке ДРОН-4 ($\text{CuK}\alpha$), а структурно-морфологические характеристики исследовали посредством сканирующего электронного микроскопа S-4800 Hitachi (Япония), размеры частиц определяли по фотографиям. Химический состав порошков оценивали на растровом электронном микроскопе Steroscan-360 фирмы Cambridge Instruments (Великобритания) с помощью энергетического спектрометра AN10 000 фирмы Link Analytical (Великобритания).

Насыщение порошка кремния водородом при термическом воздействии осуществлялось в графитовых (МПП-8) карбидизированных кюветах с объемом отдельной ячейки 1 см³ в установке эпитаксиального наращивания УНЭС-2П-КА при температуре от 297 до 723 К и в установке «Изотрон 4-150» при давлении водорода 0,1–2,0 МПа и температуре 373–773 К. Использовался водород с точкой росы (213)–(195) К. Количественное содержание водорода оценивалось по разнице веса кюветы до и после насыщения.

Насыщение порошка кремния водородом при плазменном наводороживании проводилось в плазменной установке с керамическим реактором с ВЧ-индуктором, то есть с реактором на базе высокочастотной безэлектродной разрядной системы, позволяющей получать высокую концентрацию радикалов водорода. Давление в камере варьировалось в пределах 100–500 Па, а температура – от 293 до 373 К.

Основные результаты и их обсуждение. Порошки ультрадисперсного кремния – это особая морфологическая форма кремния (Si), получаемая в результате помола микроразмерных порошков. Они характеризуются наличием широкой гаммы различной размерности наночастиц с нарушенной кристаллической решеткой кремния. В зависимости от условий получают разные степени дисперсности порошков и их химический состав.

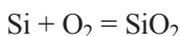
Исследования химического состава порошков, измельченных с использованием стальных шаров и стальных барабанов, показали, что полученные таким образом порошки содержат в своем составе незначительное количество железа (рис. 1).

Причиной наличия железа в составе порошка скорее всего является трение стальных шаров о стальные стенки барабана. Было установлено, что порошки кремния, полученные с использованием алундовых шаров, практически рентгеноаморфны и не содержат в своем составе железа. Они характеризуются более высокой дисперсностью по отношению к порошкам, произведенным в результате механического помола кремния с использованием стальных шаров. Это подтверждается более низкой температурой плавления 1595 К (1687 К) и более высоким значением энтропии, оцененной по результатам калориметрических исследований в бомбовом калориметре. Это значение превышает в 1,4 раза значение энтропии для кристаллитов кремния размером 43 мкм и равно 26,15 Дж/(моль · К). Снижение температуры плавления и увеличение величины энтропии свидетельствуют об увеличении беспорядка в системе аморфизированных порошков кремния и изменении термодинамических параметров системы в целом.

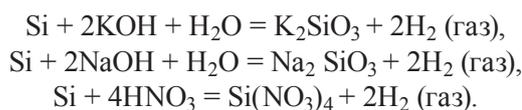
Ультрадисперсные порошки кремния с размером частиц ≤ 10 нм легко разлагают воду при комнатной температуре на водород и кислород по реакции



Они легко окисляются кислородом воздуха по реакции



и активно взаимодействуют с гидроксидами и кислотами с выделением значительного количества тепла:



Такие порошки кремния хорошо поглощают водород при температуре от 373 до 773 К. Установлено, что активация микро- и ультрадисперсных порошков кремния при температуре гидрирования 623 К в течение 30 мин и давлении водорода в проточном реакторе 0,25 МПа приводит к поглощению водорода в количестве, необходимом для образования гидроксида кремния состава SiH₂.

Дифрактограммы на рис. 2 показывают, что в результате такой обработки происходит аморфизация образца. В области, где должны находиться дифракционные максимумы кремния, наблюдается гало (рис. 2, 1). Совокупность данных позволяет предположить, что активация в области температур от 277 до 373 К обуславливает образование рентгеноаморфного гидроксида кремния. Увеличение времени термической активации до 45–60 мин не приводит к изменению фазового состава.

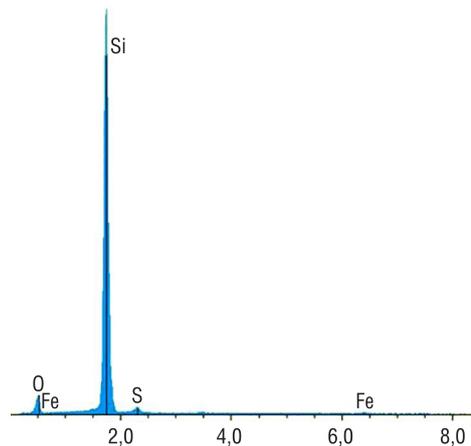


Рис. 1. Высокоэнергетические спектры кремниевого порошка, полученные в результате механического измельчения микро-размерных кристаллитов кремния

Fig. 1. High-energy spectra of silicon powder obtained as a result of mechanical grinding of micro-sized crystallites of silicon

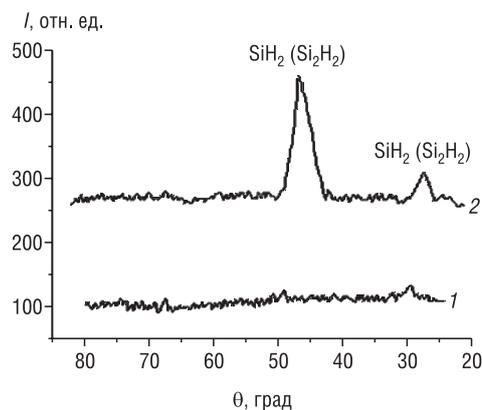
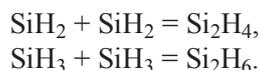


Рис. 2. Дифрактограммы гидрированных микро- и ультрадисперсных порошков кремния: 1 – микродисперсные порошки, 2 – ультрадисперсные порошки

Fig. 2. Diffractograms of hydrogenated micro- and ultrasize powders of silicon: 1 – microsize powders, 2 – ultrasize powders

Аналогичные результаты получены при температуре 673 К и времени активации 5–15 мин. Дальнейшая обработка (гидрирование) в течение 20–30 мин приводит к образованию гидроксида Si_2H_4 (рис. 2, 2) по реакциям:



Гидрид, который получается при низкой температуре (≤ 573 К), находится в равновесном состоянии при гидрировании в проточном реакторе. С прекращением термического воздействия после гидрирования обработанный порошок переходит в метастабильное состояние. Водород, поступающий в объем микро- и ультрадисперсного порошка кремния в диапазоне температур 373–723 К за счет диффузионного процесса, может реагировать не только с атомами кремния с образованием гидридов типа SiH_2 , но и с гидроксидами менее активных радикалов типа Si_2H_4 , Si_2H_6 .

Отсюда можно сделать вывод, что исходный микро- и ультрадисперсный порошок кремния полностью гидрируется по поверхности границ частиц до равновесного состояния. При этом в наводороживании микро- и ультрадисперсного порошка кремния принимают участие и активные центры, возникающие при внедрении водорода, такие как H , Si^{2+} , SiH_2 , SiH_3 и т. п.

Процесс гидрирования имеет две явно выраженные стадии. Температура перехода между стадиями определяется дисперсностью микро- и ультрадисперсных порошков кремния и структурой гидридов на поверхности частиц. Оптимальной температурой гидрирования следует принять температуру 623 К, при которой достигается максимальная подвижность атомов кремния при формировании гидроксида. При температуре выше 723 К для гидроксида Si_2H_4 (SiH_2) наблюдается резкое уменьшение содержания водорода (рис. 3).

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что скорость насыщения микро- и ультрадисперсных порошков водородом при постоянной скорости потока в проточной системе зависит от температуры процесса гидрирования водорода. При температуре 673 К оптимальная скорость насыщения химически чистым водородом при скорости потока $20 \text{ дм}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$ достигается в течение 20–30 мин.

Усиление процесса гидрирования происходит в ВЧ-плазме. В этом случае взаимодействие газовых частиц с поверхностью порошка кремния происходит через следующие стадии:

- недиссоциативная адсорбция:
- диссоциативная адсорбция:
- образование молекулярного продукта:
- десорбция молекулярного продукта:
- удаление остатков:

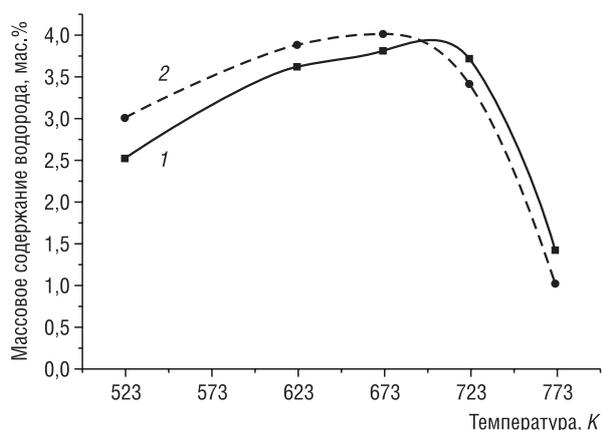
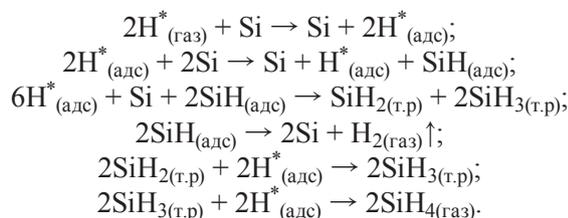


Рис. 3. Накопление водорода в порошке кремния в зависимости от температуры гидрирования: 1 – микродисперсный порошок, 2 – ультрадисперсный порошок

Fig. 3. Accumulation of hydrogen in silicon powder as a function of the hydrogenation temperature: 1 – microsize powders, 2 – ultrasize powders

Благодаря тому что реакционные частицы, такие как атомарный водород, вступают во взаимодействие со связями на поверхности частиц, образуются гидриды в результате ионно-индуцированной диссоциации нейтральных молекул и радикалов водорода, которые были первоначально адсорбированы из газовой фазы. Соответственно освобождающиеся реакционные частицы тут же образуют связи $\text{Si}-\text{H}$ без какой-либо миграции по поверхности. Проникновение атомов водорода в глубину порошков кремния и образование пассивных комплексов между атомами водорода и кремния с учетом различного рода мелких и глубоких центров, а также структурных дефектов приводит к существенной модификации свойств поверхности порошков.

Заклучение. Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что размерность кристаллитов порошков кремния определяет их теплофизические и химические свойства. Значение энтропии для наноструктурированного кремния превышает в 1,4 раза значение энтропии для кристаллитов кремния размером 43 мкм и равно 26,15 Дж/(моль · К), характеризуется более низкой температурой плавления 1595 К (1687 К). Микро- и ультрадисперсные порошки кремния хорошо поглощают водород при температуре от 373 до 773 К.

Список использованных источников

1. Гольдшлегер, У.И. Режимы горения и механизмы высокотемпературного окисления магния в кислороде / У.И. Гольдшлегер, С.Д. Амосов // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, № 3. – С. 28–39.
2. Громов, А.А. Исследование процесса окисления электровзрывного нанопорошка вольфрама в воздухе / А.А. Громов, А.П. Ильин, В.И. Верашчагин // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2003. – Т. 306, № 6. – С. 59–62.
3. Горение смесевых твердых топлив с наноразмерным алюминием / Л.Т. Де Лука [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, № 6. – С. 80–94.
4. Исследование процесса воспламенения некоторых микро- и наноструктурированных материалов / В.А. Лабунов [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2007. – № 11. – С. 12–16.
5. О горении микро- и наноструктурированных порошков кремния / А.С. Басаев [и др.] // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 12. – С. 22–30.

Reference

1. Goldshleger U. I., Amosov S. D. Combustion modes and mechanisms of high-temperature oxidation of magnesium in oxygen. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2004, vol. 40, no. 3, pp. 275–284. DOI: 10.1023/b:cesw.0000028940.02367.3a
2. Gromov A. A., Il'in A. P., Verashchagin V. I. Study of the oxidation of tungsten electric explosive nanopowder in air. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2003, vol. 306, no. 6, pp. 59–62 (in Russian).
3. De Luka L. T., Galfetti L., Severini F., Meda L., Marra Zh., Vorozhtsov A. B., Sedoi V. S., Babuk V. A. Burning of mixed solid fuels with nanosized aluminum. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2005, vol. 41, no. 6, pp. 680–692. DOI: 10.1007/s10573-005-0080-5
4. Labunov V. A., Kovalevsky A. A., Dolbik A. V., Basayev A. S., Saurov A. N., Reznev A. A. Investigation of the ignition process of some micro- and nanostructured materials. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystem Technology*, 2007, no. 11, pp. 12–16 (in Russian).
5. Basayev A. S., Saurov A. N., Labunov V. A., Kovalevsky A. A., Dobrego K. V., Reznev A. A. On the combustion of micro- and nanostructured silicon powders. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano- and Microsystem Technology*, 2009, no. 12, pp. 22–30 (in Russian).

Информация об авторах

Ковалевский Александр Адамович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Центра 4.13, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a_kovalevsky@mail.ru

Котов Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники, директор Центра 4.13, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kotov@bsuir.by

Гранько Сергей Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры микро- и наноэлектроники, декан факультета радиотехники и электроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: granko@bsuir.by

Чернаусик Ольга Михайловна – магистр технических наук, научный сотрудник Центра 4.13, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga_komar@tut.by

Корзун Кристина Александровна – магистр технических наук, научный сотрудник Центра 4.13, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kristin.korzun@gmail.com

Information about the authors

Alexander A. Kovalevskii – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Leading Researcher of the Center 4.13, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a_kovalevsky@mail.ru

Dmitry A. Kotov – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Director of the Center 4.13, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kotov@bsuir.by

Sergey V. Granko – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Dean of the Faculty of Radio Engineering and Electronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: granko@bsuir.by

Olga M. Chernayusik – Master of Engineering, Researcher of the Center 4.13, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga_komar@tut.by

Kristina A. Korzun – Master of Engineering, Researcher of the Center 4.13, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kristin.korzun@gmail.com

Л. В. Судник¹, А. Р. Лученок¹, Ю. И. Козырева¹, В. С. Ткачук¹, Т. А. Прихна², А. В. Козырев²

¹Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством
Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь
²Институт сверхтвердых материалов имени В. Н. Бакуля Национальной академии наук Украины, Киев,
Украина

УДАРНО-ВОЛНОВОЕ КОМПАКТИРОВАНИЕ ПОРОШКОВ

Аннотация. Материалы на основе МАХ-фаз имеют уникальную комбинацию свойств. Они объединяют лучшие свойства металлов и керамики. Такой набор полезных эксплуатационных параметров дает возможность широкого технического применения в различных отраслях промышленности. Однако несмотря на большое количество исследовательских работ, проведенных в данной области, получение плотного, однородного МАХ-материала остается нерешенным вопросом.

Изучались возможности метода импульсного компактирования бризантными взрывчатыми веществами для получения изделий из порошков МАХ-фаз. В качестве модельного материала для проведения исследований были использованы порошки МАХ-фаз на основе Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 , синтезированные свободным спеканием в вакууме.

Показано, что двукратное импульсное компактирование порошков на основе Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 позволяет снизить пористость прессовок с 22 % до 9 %, при этом фазовый состав материала практически не изменяется.

Испытание образцов, полученных методом импульсного компактирования, на стойкость к окислению показало, что метод ударно-волнового нагружения применим для получения конкурентоспособных материалов, реализующих потенциальные свойства МАХ-фаз. Отмечено, что для повышения жаростойкости необходимо стремиться к минимизации пористости материала. Существенное снижение пористости может быть достигнуто за счет многократного ударно-волнового нагружения материала.

Ключевые слова: МАХ-фазы, компактирование, ударно-волновое нагружение, наноматериалы, порошки, пористость, плотность, структура

Для цитирования. Ударно-волновое компактирование порошков / Л. В. Судник [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 20–26.

L. V. Sudnik¹, A. R. Luchenok¹, Yu. I. Kozyreva¹, V. S. Tkachuk¹, T. A. Prikhna², A. V. Kozyrev²

¹Research Institute of Pulse Processes with Pilot Plant of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
²V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

SHOCK-WAVE COMPACTING OF POWDERS

Abstract. Materials based on MAX phases have a unique combination of properties. They combine the best properties of metals and ceramics. Such a set of useful operational parameters allows for wide technical application in various industries. However, despite the large number of research works carried out in this area, obtaining a dense, uniform MAX material remains an unresolved issue.

The possibilities of the pulsed compacting method with blasting explosives for obtaining products from MAX phase powders were investigated. As a model material for the research, powders of MAX phases based on Ti_2AlC and Ti_3AlC_2 synthesized by free sintering in vacuum were used.

It was shown that double pulse compacting powders based Ti_2AlC Ti_3AlC_2 and reducing compacts porosity from 22 % to 9 %, is practically unchanged while the phase composition of the material.

Test samples obtained by pulsed compaction in oxidation resistance showed that the method of the shock-wave loading applicable for competitive materials realizing potential properties of MAX phases. It is noted that to increase the heat resistance it is necessary to minimize the porosity of the material. Significant reduction in porosity can be achieved due to repeated shock-wave loading of the material.

Keywords: MAX phases, shock-wave loading, compacting, powders, porosity, nanomaterials, density, structure

For citation. Sudnik L. V., Luchenok A. R., Kozyreva Yu. I., Tkachuk V. S., Prikhna T. A., Kozyrev A. V. Shock-wave compacting of powders. *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. 1, pp. 20–26 (in Russian).

Введение. МАХ-фазы являются тройными соединениями переходных металлов с азотом и углеродом. Их общая формула $M_{n+1}AX_n$ (n принимает значения от 1 до 3) отображает слоистое строение, в котором слои карбида или нитрида (МХ) чередуются со слоями интерметаллических соединений (МА) [1].

Слоистость на уровне кристаллической решетки обеспечивает материалам высокую прочность и трещиностойкость при комнатных и высоких температурах.

Материалы на основе МАХ-фаз характеризуются одновременно высокой тепло- и электропроводностью, пластичностью при высоких температурах, устойчивостью к термоудару, стойкостью к окислению и коррозии, низкой плотностью, низким коэффициентом теплового расширения и высоким уровнем демпфирующих свойств [2]. Сочетания свойств керамики и металлов при малом удельном весе делают такие материалы перспективными для использования в различных отраслях промышленности. При этом требуется решение технологических задач по переработке материала в изделие.

В рамках данного экспериментального исследования изучались возможности метода импульсного прессования с использованием бризантных взрывчатых веществ для компактирования порошков, содержащих МАХ-фазы.

Методика проведения экспериментов. Метод ударно-волнового нагружения рассматривался как альтернативный способ уплотнения МАХ-материалов. Для определения возможности применения метода ударно-волнового нагружения для компактирования МАХ-фаз были использованы порошки на основе Ti_2AlC и Ti_3AlC_2 , синтезированные свободным спеканием в вакууме при температуре $T = 1350$ °С и времени выдержки 30, 120 и 180 мин из смесей $TiC/TiH_2/Al$ с разным соотношением исходных компонентов (2/2/1,25 для Ti_2AlC и 2/1/1,25 для Ti_3AlC_2) при 25%-ном избытке алюминия с учетом испарения (табл. 1).

При синтезировании исходные компоненты сначала измельчались и смешивались в смесителе типа «пьяная бочка» в среде аргона, затем компактировались при давлении 20 МПа. Синтез материалов осуществлен в Институте сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины.

Состав, плотность, пористость и микротвердость образцов после синтеза приведены в табл. 2.

Импульсное компактирование порошков выполнялось по плоской схеме нагружения (Патент Республики Беларусь № 21555 от 12.01.2017 «Способ изготовления изделия из порошкового материала путем взрывного прессования», авторы – А. Р. Лученок, А. Ф. Ильющенко, Л. В. Судник, Г. В. Смирнов, А. А. Шевченко, Н. В. Киршина) с использованием бризантных взрывчатых веществ (аммонит № 6ЖВ) при скорости детонации 3800–4200 м/с.

Исследование фазового состава выполнялось на рентгеновском дифрактометре ULCIMA IV (Япония) в $CuK\alpha$ -излучении в диапазоне углов 2θ 18–88°.

Плотность и пористость компактов устанавливались методом гидростатического взвешивания согласно ГОСТ 24409-80. Для расчета теоретической плотности в соответствии с правилом аддитивности использовались следующие значения плотности фаз ($г/см^3$): Ti_2AlC – 4,10; Ti_3AlC_2 – 4,24; Al_2O_3 – 3,98; TiC – 4,93. Измерения микротвердости проводили по ГОСТ 9450-76.

Давление, необходимое для уплотнения порошков импульсными методами и обеспечения достаточной прочности связей между частицами, рассчитано исходя из неравенства [3]

$$P \geq \omega H_{\mu}, \tag{1}$$

где H_{μ} – микротвердость материала, $\omega = 1-2$ – эмпирическая постоянная.

С учетом начальной плотности образца давление ударной волны составляет

$$P = \frac{\rho u^2}{\Pi} = \omega H_{\mu}, \tag{2}$$

где ρ – начальная плотность, Π – пористость, u – скорость ударной волны.

Рассчитанное по экспериментальным данным P составило 3–4 ГПа.

Т а б л и ц а 1. Состав образцов и режимы синтеза
T a b l e 1. Composition of samples and modes of synthesis

№ образца	Вещество	Продолжительность синтеза, мин
1	Ti_2AlC	30
2	Ti_2AlC	120
3–5	Ti_3AlC_2	30
6	Ti_3AlC_2	180

Т а б л и ц а 2. Свойства исследуемых материалов

T a b l e 2. Properties of obtained materials

Номер образца	Стадия импульсного нагружения	Фазовый состав, мас.%					Плотность, г/см ³	Пористость, %	Микротвердость материала, МПа
		Ti ₂ AlC	Ti ₃ AlC ₂	TiC	Al ₂ O ₃	иные примеси			
1	до	86	–	11	–	(Ti ₄ N ₃) 3	3,55	15,8	–
	после	97	–	3	–	–	3,56	13,4	547
	повторное	90	3	7	–	–	3,75	9,9	–
2	до	97	–	3	–	–	3,57	13,6	–
	после	96	–	4	–	–	3,58	13,3	605
3	до	–	98	2	–	–	3,35	21,2	–
	после	17	79	3	1	–	3,67	13,3	619
	повторное	–	95	5	–	–	3,79	11,3	–
4	до	–	94	6	–	–	3,38	21,0	–
	после	–	92	6	2	–	3,68	13,8	605
5	до	–	96	4	–	–	3,36	21,2	–
	после	–	90	6	4	–	3,67	13,6	456
	повторное	32	64	4	–	–	3,83	9,3	–
6	до	–	64	36	–	–	3,15	29,5	–
	после	3	54	43	–	–	3,59	18,7	690
	повторное	–	70	30	–	–	3,89	12,1	–

Изменение внутренней энергии массы порошка за фронтом ударной волны соответствует приобретенной кинетической энергии:

$$C = \frac{u^2}{2} = \frac{\Pi \omega H_{\mu}}{2\rho} \quad (3)$$

Предполагая, что приращение внутренней энергии ΔE имеет тепловую природу, рост температуры при импульсном прессовании определяли по зависимости

$$\Delta T = \frac{\Delta E}{C} = \frac{\Pi \omega H_{\mu}}{2\rho C}, \quad (4)$$

где C – теплоемкость материала.

В соответствии с этой оценкой для полученных компактных материалов температура в условиях ударно-волнового нагружения составила 200–300 °С. При этом остаточная температура образцов, зафиксированная экспериментально, практически не отличалась от рассчитанной, достигаемой на фронте ударной волны. Это связано с тем, что адиабатическая составляющая температуры при ударно-волновом сжатии пористых материалов невелика [4].

Результаты исследований. Основными факторами воздействия взрыва на материалы являются ударные волны и волны разрежения. Параметры ударной волны связаны между собой законами сохранения массы, импульса и энергии. Отличие процессов ударно-волнового нагружения сплошных и порошковых (пористых) тел в том, что при сжатии пористого тела приращение тепловой энергии больше, чем для компактного тела.

Для обеспечения заданных свойств порошкового материала важными показателями являются значения плотности и пористости.

Из табл. 2 следует, что полученные в результате синтеза и ударно-волнового нагружения компакты имеют плотность в диапазоне 3,56–3,68 г/см³, что соответствует пористости порядка 13 %, тогда как до ударно-волнового нагружения плотность синтезированных образцов составляла 3,153,57 г/см³, что соответствует пористости порядка 21 %. Таким образом, пористость в результате однократного компактирования снизилась с 21 до 13 %.

Для увеличения плотности материала было проведено повторное импульсное нагружение образцов при тех же технологических параметрах.

Данные, приведенные в табл. 2, свидетельствуют о незначительных изменениях фазового состава в ходе ударно-волновой обработки.

Исключение составил образец № 1, для которого после компактирования зафиксировано увеличение содержания МАХ-фаз от 86 до 97 мас.% при одновременном уменьшении доли карбида титана с 11 до 3 мас.%.

Уменьшение содержания МАХ-фазы имело место в образцах № 4 и 5 в пределах 2–6 мас.%. В образце № 3 содержание Ti_3AlC_2 снизилось с 98 до 79 мас.% и образовалось значительное количество Ti_2AlC – 17 мас.%.

Отмеченные особенности связаны в основном с составом исходных материалов. Так, образцы № 1 и 3 были компактированы из порошков, синтезированных из карбида титана дефицитного по углероду, поэтому фазовый состав образцов нестабилен, но количество МАХ-фазы осталось на уровне исходного материала.

Следует отметить, что в условиях ударно-волнового нагружения происходит активация частиц порошка, что в свою очередь вызывает перегруппировку атомов в узлах кристаллической решетки с достижением состава, более близкого к равновесному. В случае образца № 1 это имеет положительный эффект и сопровождается увеличением количества фазы Ti_2AlC на 4 мас.%.

В образцах № 3 и 5 в ходе двукратного нагружения наблюдается колебание содержания МАХ-фазы в диапазоне 79–89 мас.%, что можно считать результатом разложения Ti_3AlC_2 до Ti_2AlC .

После повторного нагружения содержание Ti_2AlC в образце № 1 практически не изменилось и составило около 90 мас.%, однако отмечено снижение пористости образца с 15,8 до 9,9 %. Образец № 2 не подвергался повторному нагружению, и при высоком содержании МАХ-фазы (97 мас.%) пористость сохранилась выше 13 %. Имело место неравномерное уплотнение (в центре – до 3,58 г/см³, по краям – 3,40 г/см³). При этом фазовый состав материала остался прежним. Таким образом, для получения высокоплотного материала на основе Ti_2AlC компактирование следует проводить в несколько стадий.

В образце № 5 наблюдается повышение плотности относительно первоначального значения (от 3,36 до 3,83 г/см³) при снижении пористости до значения 9,3 %. В ходе повторного нагружения происходит разложение Ti_3AlC_2 до Ti_2AlC . Образец № 6 (с наименьшим содержанием МАХ-фазы) имеет при практически не меняющемся фазовом составе (70 мас.% Ti_3AlC_2) плотность 3,89 г/см³, пористость 12,1 % (при исходном значении пористости 29,5 %).

Чтобы проиллюстрировать целесообразность компактирования порошков МАХ-фаз методом ударно-волнового нагружения, проведены исследования по определению возможности использования полученных образцов в качестве интерконектов топливных ячеек взамен используемых сталей Crofer JDA (рис. 1). Необходимым условием для этого является стабильность свойств при работе в среде кислорода и водорода.

Для сравнительного анализа был подготовлен образец № 7, полученный методом горячего прессования под давлением 2 ГПа при температуре 1400 °С. После прессования образец имел пористость порядка 1 % и высокое содержание Ti_3AlC_2 (91 мас.%).

Результаты четырехстадийного теста для материалов на основе МАХ-фаз и стали Crofer JDA приведены на рис. 1. Кривая II на рис. 1, *b* соответствует поведению образца, предварительно окисленного 2 ч на воздухе при 1200 °С.

Структуры окисленных образцов показаны в правых верхних углах рис. 1, *a*, *b*.

Пористый материал на основе МАХ-фазы $TiAlC_2$ (пористость 22 %) окисляется очень быстро (рис. 1, *a*). В плотном материале стабилизация процесса окисления наблюдается после выдержки свыше 500 ч. Предварительное окисление при 1200 °С в течение 2 ч приводит к снижению количества оксидов (рис. 1, *b*, кривая II).

Прирост массы не превышает 0,05 мг/см². Структура и состав оксидного слоя этого материала приведены на рис. 2.

После нагрева на воздухе при 600 °С в течение 1000 ч приблизительный химический состав в отмеченных точках следующий:

S1, S4 и S5 – $SiC_{1.12}Ti_{0.04}O_{0.1}Mg_{0.01}$, $SiCTi_{0.01}$ и $SiC_{1.1}$ соответственно;

S3 (темные области) – $TiC_{5.2}Al_{0.4}O_{1.4}Na_{0.02}Mg_{0.1}Si_{0.05}$;

S3 (матрица) – $Ti_{2.2}AlC_2Si_{0.02}Fe_{0.09}$;

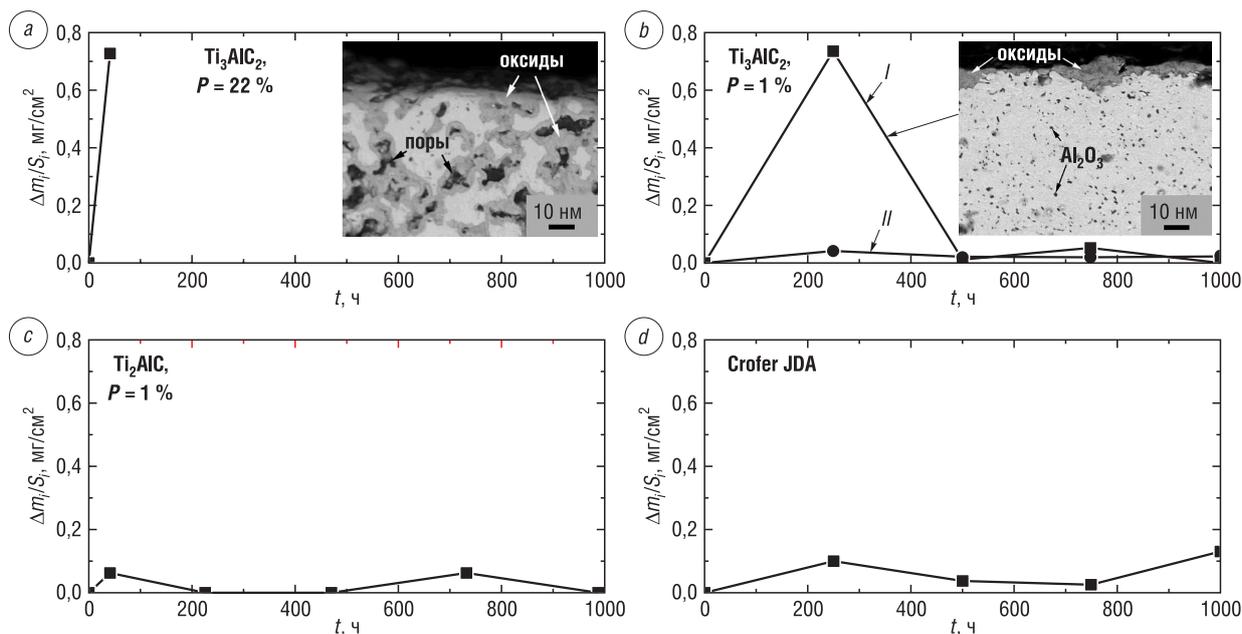


Рис. 1. Результаты исследования стойкости к длительному окислению на воздухе: *a, b, c* – МАХ-фаза; *d* – сталь Crofer JDA

Fig. 1. Results of the research of resistance to long-term oxidation in air: *a, b, c* – MAX phase; *d* – steel Crofer JDA

- S6 – $\text{TiC}_{60}\text{O}_{14}\text{Na}_{1.2}\text{Mg}_{0.08}\text{Si}_{0.2}\text{C}$;
- S7, S11 – $\text{Ti}_2\text{Al}_{0.6-1}\text{C}_{0.6-1}\text{O}_{6-7}$ (основная составляющая пленки);
- S8 – $\text{ZrO}_2\text{CTi}_{0.03}$;
- S9 – $\text{C}_{107}\text{TiAl}_2\text{O}_{12}\text{Mg}_{0.1}\text{Si}_{2.3}$;
- S10 – $\text{AlC}_{0.6}\text{O}_6\text{Si}_{1.1}\text{Na}_{0.02}$;
- S01 – $\text{TiC}_{1.12}\text{O}_{3.1}$;
- S02 – $\text{TiAl}_{1.16}\text{C}_{2.3}\text{Nb}_{0.04}\text{O}_{10.4}$;
- S03 – $\text{TiAl}_{1.8}\text{C}_4\text{O}_{8.2}\text{Mo}_{0.05}\text{Si}_{0.17}$;
- S04 – $\text{Ti}_{3.1}\text{AlC}_{2.9}\text{Nb}_{0.11}\text{O}_{0.37}$;
- S05 – $\text{Ti}_{2.7}\text{AlC}_{4.3}\text{Nb}_{0.13}\text{O}_{0.8}$;
- S06 – $\text{Ti}_{1.8}\text{AlC}_{1.7}\text{Nb}_{0.05}\text{O}_{1.9}\text{Mg}_{0.1}$;
- S07 – $\text{Ti}_{2.7}\text{AlC}_{2.3}\text{Nb}_{0.08}\text{O}_{0.3}$;
- S08 – $\text{Al}_2\text{O}_4\text{Ti}_{0.16}\text{C}_{0.4}$.

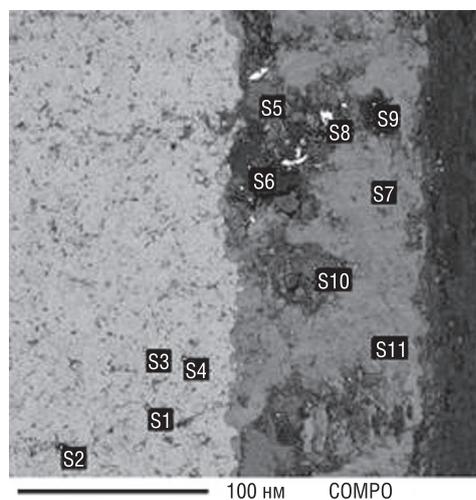


Рис. 2. Структура образца на основе Ti_3AlC_2
 Fig. 2. Structure of the sample based on Ti_3AlC_2

Указанные данные свидетельствуют о том, что стабильным в окислительной среде при температуре до 600 °С является материал с минимальной пористостью (см. рис. 1, *b*). Для сравнения приведены данные для стали Crofer JDA, окисленной в таких же условиях (см. рис. 1, *d*). Значение $\Delta m_i/S_i$ для стали значительно выше, чем для материала на основе Ti_3AlC_2 . После первого этапа испытаний на длительную стойкость в окислительной среде оксидная пленка состояла из внутреннего слоя Cr_2O_3 и поверхностного слоя MnCr_2O_4 , потому что скорость диффузии Mn через внутренний слой Cr_2O_3 вдвое больше, чем Cr и Fe. Поверхностный слой способствует диффузии Cr из материала и прониканию оксида в материал.

Таким образом, на высокоплотные МАХ-материалы слабо влияют высокие температуры (600 °С) и водородная среда, они имеют более высокую прочность и стойкость к окислению (при 600 °С, 1000 ч), чем стали Crofer JDA.

Заклучение. Устаноўлена возможность использования ударно-волнового нагружения для компактирования порошков МАХ-фаз в системе Ti–Al–C. Показано, что в ходе обработки порошков $TiAlC_2$ и Ti_3AlC_2 пористость в зависимости от состава материала снижается до 9 % при первоначальной 22 %, фазовый состав практически не изменяется.

На примере сравнительных испытаний стойкости к окислению продемонстрировано, что метод ударно-волнового нагружения применим для получения конкурентоспособных материалов, реализующих потенциальные свойства МАХ-фаз. Отмечено, что для повышения жаростойкости необходимо стремиться к минимизации пористости материала. Существенное снижение пористости материала может быть достигнуто за счет многократного импульсного нагружения материала.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (Т15УК/А-068) совместно с Институтом сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля Национальной академии наук Украины.

Acknowledgements

The study was carried out at support of the grant of the Executive Board of the Foundation (T15UK/A-068), together with the V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Список использованных источников

1. Сметкин, А. А. Свойства материалов на основе МАХ-фаз (обзор) / А. А. Сметкин, Ю. К. Майорова // Вестн ПНИПУ. Машиностроение, материаловедение. – 2015. – № 4. – С. 120–138.
2. Исследование условий синтеза МАХ-фаз системы TiAlC и их компактирование методом ударно-волнового нагружения / Л. В. Судник [и др.] // Порошковая металлургия: Респ. межведомств. сб. науч. тр. – Минск: Беларус. наука, 2016. – Вып. 39. – С. 113–120.
3. Селиванов, В. В. Взрывные технологии / В. В. Селиванов, И. В. Кобылкин, С. А. Новиков. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. – 519, [1] с.
4. Ударно-волновые явления в конденсированных средах / Г. И. Канель [и др.]. – М.: Якус-К, 1996. – 408 с.

Reference

1. Smetkin A. A., Mayorov Yu. K. Properties of materials based on MAX-phases (review). *Vestnik PNIPIU. Mashinostroenie, materialovedenie* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University. Mechanical Engineering, Materials Science], 2015, no. 4, pp. 120–138 (in Russian).
2. Sudnik L.V., Luchenok A. R., Kolodkevich Yu. I., Tkachuk V. S., Prikhna T. A., Basyuk T. V., Kozyrev A. V. Investigation of synthesis MAX phases of the system Ti–Al–C and compacting by method of shock wave loading. *Poroshkovaya metallurgiya. Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Inter-Institutional Collection of Scientific Papers.]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, Issue 39, pp. 113–120 (in Russian).
3. Selivanov V. V., Kobylkin I. V., Novikov S. A. *Explosive technologies*. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2014. 519 p. (in Russian).
4. Kanel G. I., Razorenkov S. V., Utkin A. V., Fortov V. Y. *Shock-wave phenomena in condensed environment*. Moscow, Yakus-K Publ., 1996. 408 p. (in Russian).

Информация об авторах

Судник Лариса Владимировна – доктор технических наук, директор, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 12б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: impuls@bn.by

Лученок Алексей Романович – старший научный сотрудник, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 12б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alar@tut.by

Козырева Юлия Ивановна – инженер, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 12б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: juliakolodkevich@gmail.com

Information about the authors

Larysa V. Sudnik – D. Sc. (Engineering), Director, Research Institute of Impulse Processes with Pilot Plant of the National Academy of Sciences of Belarus (12b, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: impuls@bn.by

Aleksey R. Luchenok – Senior Researcher, Research Institute of Impulse Processes with Pilot Plant of the National Academy of Sciences of Belarus (12b, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alar@tut.by

Yuliya I. Kozyreva – Engineer, Researcher, Research Institute of Impulse Processes with Pilot Plant of the National Academy of Sciences of Belarus (12b, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: juliakolodkevich@gmail.com

Ткачук Виктор Сергеевич – инженер, Научно-исследовательский институт импульсных процессов с опытным производством Института порошковой металлургии Национальной академии наук Беларуси (ул. Платонова, 12б, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.tkachuk@tut.by

Прихна Татьяна Алексеевна – член-корреспондент Национальной академии наук Украины, доктор технических наук, профессор, заведующая отделом «Технологии высоких давлений, функциональных керамических композитов и дисперсных сверхтвердых материалов», Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля Национальной академии наук Украины (ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина). E-mail: prikhna@iptelecom.net.ua

Козырев Артем Вячеславович – кандидат химических наук, доцент, старший научных сотрудник, Институт сверхтвердых материалов им. В.Н.Бакуля Национальной академии наук Украины (ул. Автозаводская, 2, 04074, Киев, Украина). E-mail: artem.v.kozyrev@gmail.com

Victor S. Tkachuk – Engineer, Researcher, Research Institute of Impulse Processes with Pilot Plant of National Academy of Sciences of Belarus (12b, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.tkachuk@tut.by

Tatiana A. Prikhna – Corresponding Member of the National Academy of Ukraine, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Division “Technologies of high pressures, functional ceramic composites and dispersed superhard materials”, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Ukraine (2, Avtozavodska Str., 04074, Kiev, Ukraine). E-mail: prikhna@iptelecom.net.ua

Artem V. Kozyrev – Ph. D. (Chemistry), Associate Professor, Senior Researcher, V. Bakul Institute for Superhard Materials of the National Academy of Ukraine (2, Avtozavodska Str., 04074, Kiev, Ukraine). E-mail: artem.v.kozyrev@gmail.com

А. Ф. Ильющенко^{1,2}, Е. Е. Петюшик¹, О. К. Кривонос¹

¹Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии, Минск, Беларусь

²Институт порошковой металлургии, Минск, Беларусь

МОДИФИЦИРОВАНИЕ ЭНЕРГОНАСЫЩЕННОГО ГЕТЕРОГЕННОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ЦИКЛИЧНЫМИ НИТРАМИНАМИ

Аннотация. Приведено описание способов повышения основных характеристик (плотность, теплота сгорания, температура горения, показатель газообразования) и эксплуатационных свойств (скорость и температура горения, полный и удельный импульс, свойства продуктов сгорания) энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала введением энергетических добавок в виде мелкодисперсных сферических порошков высокоэнергетических металлов или их сплавов, неметаллических материалов, дана оценка их эффективности с учетом технологичности и безопасности использования. Рассмотрено влияние основных ингредиентов композиционного материала на его эксплуатационные свойства.

Дан анализ современных подходов ведущих производителей к повышению эксплуатационных свойств энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала путем введения в его состав одного из циклических нитрамина с последующим модифицированием пластификаторами, обеспечивающим снижение чувствительности материала. Проведены термодинамические расчеты для ряда составов энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала, содержащего пластифицированные вторичные циклические нитрамина. Выполнен комплекс экспериментальных исследований образцов материала различных составов и определены их основные свойства.

Показана возможность равноценной замены в составе энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала мелкодисперсного порошка алюминия на один из флегматизированных циклических нитрамина. По результатам термодинамических расчетов и на основании комплекса экспериментальных исследований энергетических характеристик материала подтверждена возможность такой замены и определены границы приемлемого содержания циклических нитрамина в составе энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала. Сформулированы задачи для выхода на промышленную технологию изготовления на отечественных предприятиях рассмотренного класса материалов, модифицированных циклическими нитраминами.

Ключевые слова: энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы, циклические нитрамина, удельный импульс, модифицирование

Для цитирования. Ильющенко, А. Ф. Модифицирование энергонасыщенного гетерогенного композиционного материала циклическими нитраминами / А. Ф. Ильющенко, Е. Е. Петюшик, О. К. Кривонос // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 27–33.

A. Ph. Ilyushchanka^{1,2}, Ya. Ya. Piatsiushyk¹, A. K. Kryvanos¹

¹State Research and Production Powder Metallurgy Association, Minsk, Belarus

²Powder Metallurgy Institute, Minsk, Belarus

MODIFICATION OF THE ENERGY-SATURATED HETEROGENEOUS COMPOSITE MATERIAL BY CYCLIC NITRAMINES

Abstract. Several methods have been described for increasing the main characteristics (density, heat of combustion, combustion temperature, gas formation index) and operating properties (combustion speed and temperature, total and specific impulse, properties of combustion products) of an energy-saturated heterogeneous composite material by introducing energy additives in the form of fine-dispersed spherical powders of high-energy metals or their alloys, non-metallic materials. Their efficiency has been estimated taking into account the workability and safety of use. The influence of the main ingredients of the composite material on its operating properties has been considered.

An analysis of modern approaches of leading manufacturers has been given to increase the operational properties of energy-saturated heterogeneous composite material by introducing into its composition one of the cyclic nitramines with subsequent modification by plasticizers, providing a decrease in the sensitivity of the material. Thermodynamic calculations have been carried out for a number of compositions of an energy-saturated heterogeneous composite material containing plasticized secondary cyclic nitramines. A complex of experimental studies of material samples of various compositions has been performed and their main properties have been determined.

A possibility of an equivalent substitution of finely dispersed aluminum powder in the composition of an energy-saturated heterogeneous composite material for one of the phlegmatized cyclic nitramines. According to the results of thermodynamic calculations and a complex of experimental studies of the energy characteristics of the material, the possibility of such a substitution has been confirmed and the boundaries of the acceptable content of cyclic nitramines in the composition of an energy-saturated heterogeneous composite material have been determined. The tasks for entering the industrial technology of manufacturing at the domestic enterprises of the considered class of materials modified with cyclic nitramines have been formulated.

Keywords: energy-saturated heterogeneous composite materials, cyclic nitramines, specific impulse, modification

For citation. Плушчанка А. Ф., Пяцішчык Я. Я., Крыванос А. К. Модифікацыя энерга-насычаных гетэрагенных кампазіцыйных матэрыялаў з цыклічных нітрамінаў. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 27–33 (in Russian).

Введение. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы (ГКМ) являются источниками энергии целого ряда технических систем, работающих на основе использования реактивной тяги, создаваемой в процессе контролируемого горения указанного класса материала. Современные ГКМ представляют собой смесь равномерно распределенных полидисперсных фракций окислителя в среде полимера, который одновременно выполняет функцию связующего материала и является горючим [1]. Продукцию из ГКМ чаще всего используют в виде компактных изделий заданных размеров и формы. Изначально этот материал представляет собой гетерогенную субстанцию с достаточно высоким показателем вязкости (иногда до 10^5 Па·с), которая по мере полимеризации приобретает форму заполненной ею емкости.

В зависимости от особенностей технологии изготовления ГКМ и требуемых характеристик в состав такого материала могут вводиться технологические добавки, пластификаторы, стабилизаторы и антиоксиданты, которые в настоящее время представлены широким набором химических веществ и соединений.

Постановка задачи. Основными характеристиками, отражающими свойства ГКМ, являются плотность, теплота сгорания, температура горения, показатель газообразования. Эксплуатационные свойства указанного материала в основном определяются скоростью и температурой его горения, полным и удельным импульсом, свойствами продуктов сгорания ГКМ (прозрачность реактивной струи, степень ее абразивного воздействия на корпусные элементы технической системы) [2, с. 394–395].

В целях повышения удельного и полного импульса, скорости горения ГКМ в его состав вводят энергетические добавки в виде мелкодисперсных сферических порошков высокоэнергетических металлов или их сплавов, а также их гидридов или боридов. Использование в качестве энергетической добавки гидридов или боридов указанного класса металлов, как правило, ведет к существенному усложнению технологии изготовления ГКМ при незначительном приросте удельного импульса готового продукта [3]. Проведенный в [4] анализ показал, что наиболее подходящей энергетической добавкой по основным параметрам является мелкодисперсный сферический алюминий марок АСД или ПАД, что подтверждается на практике ведущими производителями ГКМ.

Экспериментально доказано, что введение мелкодисперсного сферического порошка алюминия при теплоте его сгорания 5300 ккал/кг и энтальпии образования конечного продукта горения $\Delta H_{298}(\text{Al}_2\text{O}_3)$ минус 1675 кДж/моль существенно повышает удельный импульс ГКМ. В то же время применение алюминия в составе ГКМ связано с рядом проблем, проявляющихся в его неполном сгорании и агломерации, а также в образовании конденсированных продуктов в волне горения. В последующем это сказывается на работе технического устройства и приводит к потере удельного импульса, эрозионному воздействию на элементы конструкции технической системы, образованию шлаков в камере сгорания и повышенной дымности выхлопной струи [5].

Приведенные недостатки алюминия обуславливают необходимость поиска веществ или смесей, которые можно использовать в качестве энергетической добавки без снижения удельного импульса ГКМ относительно его алюминизированного аналога.

Большинство производителей ГКМ в качестве такой замены рассматривают некоторые циклические нитрамины (N-нитроамины) [6], например 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадиазоциклогексан $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$ или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадиазоциклооктан $(\text{CH}_2)_4\text{N}_4(\text{NO}_2)_4$ и др. Однако

названные нитрамины являются достаточно высокочувствительными веществами, введение которых в состав смесевой композиции без предварительной подготовки может привести к неконтролируемой реакции с выделением большого количества теплоты и газов [7, с. 10].

С учетом изложенного *целью работы* ставится выявление возможности и определение условия равноценной замены мелкодисперсного порошка алюминия на один из циклических нитраминов, а также экспериментальное подтверждение данной гипотезы. При установлении такой возможности предполагается определить перечень задач, решение которых позволит выйти на промышленную технологию изготовления ГKM, модифицированного одним из циклических нитраминов.

В настоящее время известно несколько подходов к снижению чувствительности 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана. Наиболее распространенными из них являются модифицирование этих нитраминов:

пластификаторами, например парафином, воском, церезином, диоктилсебацатом и др. Введение указанных пластификаторов снижает вероятность их неконтролируемой реакции [8];

графитовыми покрытиями [9]. Нанесение графитовых покрытий на частицы уменьшает статическое напряжение, что приводит к переводу таких покрытий в полупроводниковое состояние и тем самым снижает степень чувствительности к механическим воздействиям на этапе их смешивания и формования;

1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензолом в сочетании с углеродом с нанесенным на него оксидом металла в среде поливинилового спирта (Патент RU 2441859) и др.

При кажущейся проработанности вопроса проблема снижения чувствительности циклических нитраминов в настоящее время окончательно не решена, так как каждый из приведенных подходов имеет свои недостатки. Так, модифицирование 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана графитовым покрытием из спиртового коллоидного раствора приводит к повышению пожарной опасности технологии изготовления ГKM.

Снижение чувствительности циклических нитраминов за счет введения в их состав 1,3,5-триамино-2,4,6-тринитробензола в сочетании с углеродом и нанесенным на него оксидом металла в среде поливинилового спирта технологически сложно и ограничивается доступностью необходимого сырья на рынке, а предложенные составы ГKM с ультрадисперсным алмазом ввиду своих реологических свойств технологически не реализуемы.

Вышеприведенные особенности модификации ГKM существенно усложняют технологию его изготовления, определяя необходимость проведения комплекса мероприятий по обеспечению промышленной безопасности. Наиболее безопасным в настоящее время является способ модификации 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана пластификаторами типа воск, парафин, церезин, диоктилсебацат и др.

Наряду с необходимостью снижения чувствительности циклических нитраминов проблемным вопросом по-прежнему остается отсутствие гарантированных поставщиков данного класса высокоэнергетического материала. Так, в Республике Беларусь не налажено их промышленное производство. Единственным производителем 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктана в Российской Федерации является Завод имени Я. М. Свердлова (г. Дзержинск, Нижегородская область), который при наличии большого спроса на внутреннем российском рынке не может рассматриваться в качестве гарантированного поставщика сырья для белорусского производства ГKM. Поэтому необходимость отработки промышленной технологии с большим объемом ежегодного выхода модифицированного ГKM требует поиска других источников надежных поставок пластифицированных циклических нитраминов.

С учетом изложенного для изготовления ГKM, модифицированного рассмотренным классом нитраминов, целесообразно использовать пластифицированные вторичные 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексан или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазадициклооктан, получаемые в ходе промышленной утилизации боеприпасов на соответствующих предприятиях страны (Центр утилизации авиационных средств поражения и Центр утилизации артиллерийских и инженерных боеприпасов).

Теоретическая часть исследования. В целях оценки возможности равноценной замены порошка алюминия на указанные циклические нитрамины проводились термодинамические расчеты для составов ГKM, содержащего Al до 15 % (контрольный образец), а также модифицированного

1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадиазоциклогексана $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$ с его содержанием 5 %, 10 % и 15 % (образцы № 1, 2 и 3 соответственно). Результаты расчетов для указанных композиций приведены в таблице.

Теплота сгорания ГKM определялась по данным элементарного состава с помощью эмпирической формулы Менделеева [10, с. 14], а теоретический удельный импульс J_s (J_v) вычислен при условии идеального расширения, без потерь расхождения или других потерь, связанных с отклонениями от идеального исполнения.

Результаты термодинамических расчетов
The results of thermodynamic calculations

Топливная композиция	Содержание энергетической добавки, %	T , К	ρ , г/см ³	J_s , Н·с/кг	J_v , Н·с/дм ³
ГKM (модифицированный Al), контрольный образец	15	1765	1,600	1999,2	300,7
ГKM (модифицированный пластифицированным $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, образец № 1	5	1538	1,635	2294,2	382,8
ГKM (модифицированный пластифицированным $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, образец № 2	10	1484	1,631	2148,2	358,1
ГKM (модифицированный пластифицированным $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, образец № 3	15	1436	1,627	2007,0	333,2

Проведенные расчеты (таблица) показали увеличение удельного импульса ГKM, модифицированного $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, относительно контрольного образца при относительно равной плотности смеси композиции. Также модифицирование ГKM указанным нитрамино способствует снижению его рабочей температуры горения (\approx на 300 К), что соответствующим образом влияет на формирование прочностных и жаростойких требований к самой технической системе и отражается на ее стоимости. С учетом результатов, полученных по итогам расчетов, спланирована экспериментальная часть исследования.

Экспериментальная часть исследования. По разработанной технологии в стандартном смесителе роторного типа изготовлены экспериментальные составы ГKM с 5%-ным содержанием пластифицированного $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$ – образец № 1, 10%-ным – образец № 2 и 15%-ным – образец № 3.

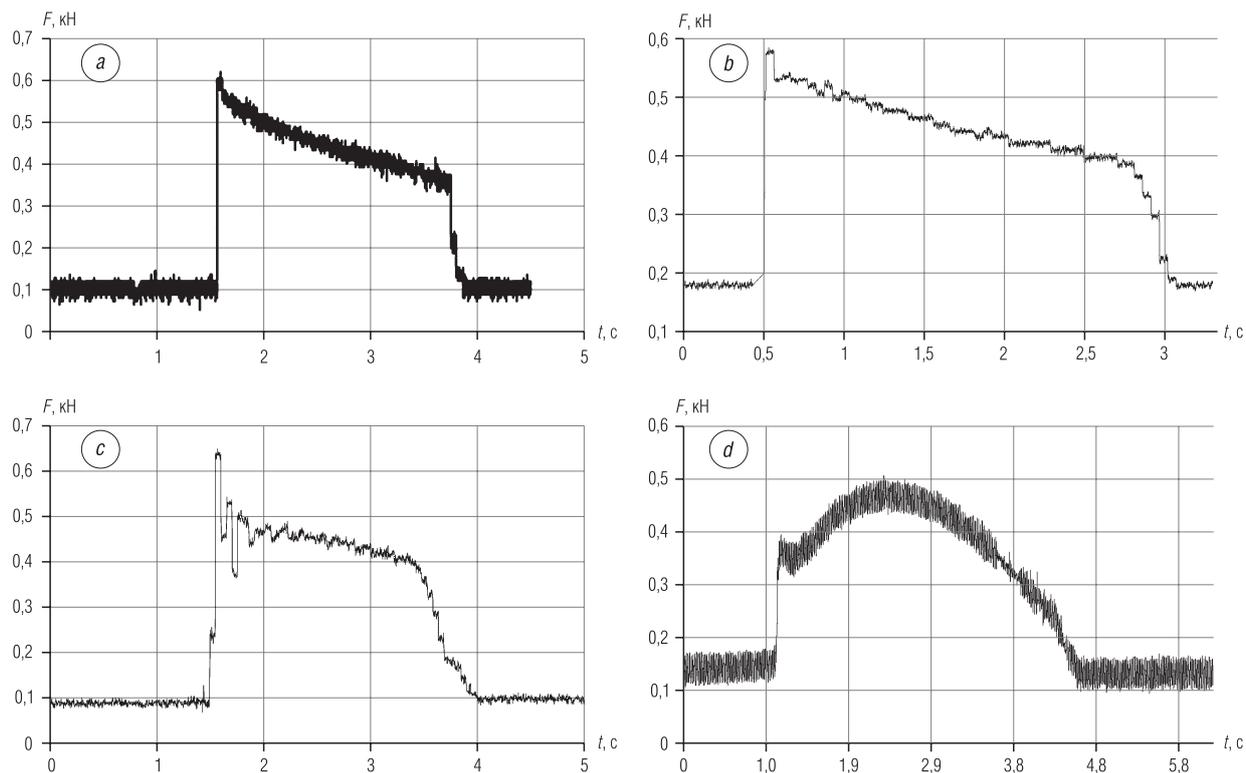
Полученная масса с вязкостью $4,8 \cdot 10^3$ Па·с заливалась по ГОСТ 18 616-80 в подготовленные формы с внутренним диаметром 66,4 мм и высотой 160 мм. Ее отверждение проводилось по рекомендованному регламенту для принятого полимера. Для формирования внутреннего канала использовался центральный стержень с диаметром 40 мм. После полимеризации образцов центральный стержень извлекался с помощью прессового оборудования.

Параметры изготовленных образцов оценивались в ходе их стендовых испытаний. Условия проведения испытаний устанавливались следующие: температура окружающей среды -5 °С, относительная влажность воздуха 91 %.

В ходе испытаний все образцы продемонстрировали стабильность горения при различных значениях давления, подтвердив расчетные показатели (см. таблицу). Время воспламенения составило менее 40 мс, а скорость горения при нормальном давлении – около 6,6 мм/с. С выходом на стабильный режим горения отмечено отсутствие пламени и прозрачность струи выхлопных газов у образцов № 1 и 2. Выхлопная струя образца № 3 имела характерный для данного класса материала полупрозрачный дым, наличие которого, предположительно, обусловлено избыточным содержанием неокисленного углерода.

Экспериментальные значения величины тяги, полученные в ходе испытаний для всех вариантов изготовленной топливной композиции, представлены на рисунке (а–с). Для сравнения показаны аналогичные параметры контрольного образца с содержанием алюминия до 15 % и испытанного на стенде композиционного материала при идентичных условиях (вариант d).

Сравнительный анализ представленных на рисунке диаграмм подтверждает возможность модификации ГKM циклическими нитраминами с их содержанием от 5 до 15 % от общей массы всех компонентов. Дальнейшее увеличение доли 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадиазоциклогексана или



Диаграммы горения ГКМ, модифицированного флегматизированным $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$: *a* – 5 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *b* – 10 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *c* – 15 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *d* – до 15 % Al

Combustion diagrams of HCM modified with phlegmatized $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$: *a* – 5 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *b* – 10 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *c* – 15 % $(\text{CH}_2)_3\text{N}_3(\text{NO}_2)_3$, *d* – up to 15 % Al

1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана выше 15 % в составе ГКМ ведет к падению тяги по причине недостатка окислителя, необходимого для горения полимера.

Таким образом, в ходе эксперимента подтверждена возможность полноценной замены в составе ГКМ порошка алюминия на один из флегматизированных циклических нитраминов, получаемых в ходе промышленной утилизации боеприпасов; определены границы приемлемого содержания циклических нитраминов в составе ГКМ на основе полиэфирной смолы, а также один из возможных составов; разработаны основы технологии изготовления безметаллического ГКМ.

С учетом полученных в ходе стендовых испытаний результатов состав образца с содержанием от 5 до 15 % 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана может быть принят за основу для изготовления безметаллического ГКМ. Предложенный состав может использоваться в технических системах, в которых критично наличие твердых частиц оксида алюминия в выхлопной струе, продукты горения не оказывают абразивно-разрушающего воздействия на этапе старта и не формируют дымовой завесы, негативно влияющей как на работу других узлов и агрегатов всей системы в целом, так и технического персонала, обслуживающего данную систему.

Практически подтверждено (Патент RU 2258057), что необходимая по массе доля флегматизированного 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана для детонации несгоревшего ГКМ при встрече технической системы с преградой составляет 10–15 %. Введение в состав ГКМ более 15 % флегматизированного 1,3,5-тринитро-1,3,5-триазадициклогексана или 1,3,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетраазациклооктана приводит к увеличению дымности выхлопной струи в ходе его горения, что создает помехи подсистеме наблюдения и управления.

В целях дальнейшего освоения разработанного состава ГКМ в производстве необходимо: определить целесообразный фракционный состав, обеспечивающий максимальную плотность упаковки, закон горения для данного состава; провести весь комплекс стендовых испытаний

(на изменение температуры окружающей среды, виброустойчивость, чувствительность к механическим воздействиям и др.), испытания на прозрачность выхлопной струи, а также натурные испытания в составе технической системы. По результатам испытаний следует уточнить состав и технологию изготовления ГKM; разработать технологический процесс изготовления ГKM, модифицированного флегматизированными циклическими нитраминами; изготовить необходимое технологическое оборудование и оснастку.

Наряду с доработкой полученного состава целесообразно продолжить исследования вопросов использования конверсионных материалов в изготовлении ГKM. Для этого необходимо: исследовать возможность изготовления ГKM с введением в его состав в качестве энергетической добавки других высокоэнергетических материалов, получаемых в ходе промышленной утилизации; определить наиболее целесообразные стабилизаторы горения флегматизированных циклических нитраминах для всего диапазона рабочих температур и давлений; установить для всех разработанных составов целесообразный фракционный состав, обеспечивающий максимальную плотность упаковки; определить закон горения для всех разработанных составов. По результатам перечисленных работ следует обозначить направления исследований по дальнейшей локализации производства ГKM и его компонентов на отечественных предприятиях.

Выводы. Модифицирование ГKM одним из флегматизированных циклических нитраминах делает процесс его изготовления более безопасным ввиду отсутствия необходимости снижать его чувствительность на этапе подготовки исходных компонентов перед смешиванием, а также дает возможность повторного использования конверсионных материалов, что существенно снижает стоимость конечного продукта. Указанные свойства разработанного ГKM способствуют дальнейшему развитию ряда технических систем, существенно увеличивая эффективность их применения по назначению за счет лучшей управляемости.

Решение приведенных задач позволит отработать методологию модификации ГKM доступными на внутреннем рынке флегматизированными циклическими нитраминами, создать технологический задел для дальнейшей локализации производства данного класса композиционного материала и продолжить работы по поиску энергетических добавок, удовлетворяющих современным требованиям.

Список использованных источников

1. Энергонасыщенные гетерогенные композиционные материалы на полимерной основе. Некоторые проблемы разработки и пути их решения / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: Респ. межведомств. сб. науч. тр. / редкол.: А.Ф. Ильющенко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2016. – Вып. 39. – С. 12–16.
2. Алемасов, В.Е. Теория ракетных двигателей: учеб. для студентов высш. техн. учеб. заведений / В.Е. Алемасов, А.Ф. Дрегаллин, А.П. Тишин; под ред. В.П. Глушко. – М.: Машиностроение, 1989. – 533 с.
3. Бондаренко, С.Г. Эффективность применения гидроксида алюминия для ракетно-космических двигателей на пастообразном топливе / С.Г. Бондаренко, В.А. Габринец // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – №4 (121). – С. 96–103.
4. Энергетические добавки в составе смесевых энергонасыщенных композиционных гетерогенных материалов / А.Ф. Ильющенко [и др.] // Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы, сварка: сб. докл. 10-го Междунар. симп. – Минск: Беларус. навука, 2017. – С. 429–440.
5. Воспламенение, горение и агломерация капсулированных частиц алюминия в составе смесового твердого топлива. II. Экспериментальные исследования агломерации / О.Г. Готов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43, № 3. – С. 83–97.
6. Новые тенденции в области создания перспективных высокоэнергетических материалов / М.Б. Талавар [и др.] // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43, № 1. – С. 72–85.
7. Шарнин, Г.П. Химия энергоемких соединений / Г.П. Шарнин; М-во образ. и науки Рос. Федерации, Казан. нац. исслед. техн. ун-т. – Казань: КНИТУ, 2011. – Кн. 2: N-, O-нитросоединения, фуросаны, фуразаны, азиды, диазосоединения. – 376 с.
8. Орлова, Е.Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ / Е.Ю. Орлова. – Л.: Химия, 1973. – 688 с.
9. Алейников, В.А. Нанопокртия компонентов смесевых конденсированных систем / В.А. Алейников, В.М. Мальцев, Ю.М. Милехин // Нанокompозиты: исследования, производство и применение: тез. докл. Междунар. науч.-практ. конф. по перспективным композиционным материалам «Нанокompозиты-2004». – М., 2004. – С. 102–103.
10. Основы практической теории горения / В.В. Померанцев [и др.]; под ред. В.В. Померанцева. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 312 с.

References

1. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Smirnov G. V. Energy-saturated heterogeneous composite materials on a polymer base. Some development issues and ways to solve them. *Poroshkovaya metallurgiya: Respublikanskii mezhvedomstvennyi sbornik nauchnykh trudov* [Powder Metallurgy: Republican Inter-Institutional Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2016, Issue 39, pp. 12–16 (in Russian).
2. Alemasov V. E., Dregalin A. Ph., Tishin A. P., Glushko V. P. (ed.). *The theory of rocket engines: a textbook for students of higher technical educational institutions*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 533 p. (in Russian).
3. Bondarenko S. G., Gabrinetz V. A. Efficiency of aluminum hydride application for paste fuel aerospace. *Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya = Aerospace Technic and Technology*, 2015, no. 4 (121), pp. 96–103 (in Russian).
4. Ilyushchanka A. Ph., Kryvanos A. K., Piatsiushyk Ya. Ya., Petrov I. V., Smirnov G. V., Sudnik L. V. Energetic additives in the composition of mixed energy-saturated composite heterogeneous materials. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novye poroshkovye kompozitsionnye materialy, svarka: sbornik dokladov 10 mezhdunarodnogo simpoziuma* [Powder Metallurgy: surface engineering, new powder composite materials, welding: Collection of Reports of the 10th International Symposium]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2017, pp. 429–440 (in Russian).
5. Glotov O. G., Yagodnikov D. A., Vorob'ev V. S., Zarko V. E., Simonenko V. N. Ignition, combustion and agglomeration of encapsulated aluminum particles in a mixed solid fuel composition. II. Experimental studies of agglomeration. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 320–333. DOI: 10.1007/s10573-007-0045-y
6. Talavar M. B., Sivabalan R., Anniyapan M., Gore G. M., Astana S. N., Gandhe B. R. New trends in the development of promising high-energy materials. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2007, vol. 43, no. 1, pp. 62–72. DOI: 10.1007/s10573-007-0010-9
7. Sharnin G. P. *Chemistry of energy-rich compounds. Book 2. N-, O-nitro compounds, furoxanes, furazans, azides, diazo compounds*. Kazan', Kazan National Research Technological University, 2011. 376 p. (in Russian).
8. Orlova E. Yu. *Chemistry and Technology of Disruptive Explosives*. Leningrad, Khimiya Publ., 1973. 688 p. (in Russian).
9. Aleinikov V. A., Maltsev V. M., Milekhin Yu. M. Nano-coating of the components of mixed condensed systems. Nano-composites: research, production and application. *Nanokompozity: issledovaniya, proizvodstvo i primeneniye: tezisy dokladov Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii po perspektivnym kompozitsionnym materialam "Nanokompozity-2004"* [Nano-composites: research, production and application: Abstracts of the Reports of the International Scientific and Practical Conference on Promising Composite Materials "Nano-composites-2004"]. Moscow, 2004, pp. 102–103 (in Russian).
10. Pomerantsev V. V., Aref'ev K. M., Akhmedov D. B., Konovich M. N., Korchunov Yu. N., Rundygina Yu. A., Shagalova S. L., Shestakov S. M. *The fundamentals of the practical theory of combustion: a textbook for high schools*. Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1986. 312 p. (in Russian).

Информация об авторах

Ильющенко Александр Федорович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, генеральный директор, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Петюшик Евгений Евгеньевич – доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: pet65@bk.ru

Кривонос Олег Константинович – кандидат военных наук, заместитель генерального директора, Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Information about the authors

Aliaksandr F. Ilyushchanka – Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, General Director, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: alexil@mail.belpak.by

Yauheni Ya. Piatsiushyk – D. Sc. (Engineering), Professor, Deputy of General Director for Research, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: pet65@bk.ru

Aleh K. Kryvanos – Ph. D. (Military Science), Deputy of General Director, State Research and Production Powder Metallurgy Association (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: Krivonos_ok@tut.by

Г. Ф. Ловшенко

Белорусская государственная академия авиации, Минск, Беларусь

НАНОСТРУКТУРНЫЕ МЕХАНИЧЕСКИ ЛЕГИРОВАННЫЕ ДИСПЕРСНО-УПРОЧНЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ

Аннотация. Развитие современных отраслей промышленности требует создания новых материалов, обладающих наряду со специальными свойствами высокой прочностью и жаропрочностью. Наиболее сложным является обеспечение последней. Для ее повышения необходимо уменьшить до предельно допустимого значения величину свободного перемещения дислокаций, локализовать передвижение дефектов кристаллического строения в пределах зерна (субзерна), минимизировать сток дефектов кристаллического строения на границы зерен, исключить межзеренное скольжение, что может быть успешно реализовано в дисперсно-упрочненных материалах. Для их получения перспективной является технология, основанная на реакционном механическом легировании.

В статье представлены результаты работы автора, позволившие установить закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных дисперсно-упрочненных материалов на основе металлов, являющихся базисом для производства основных конструкционных сплавов из алюминия, меди, железа и никеля. Эти сплавы используются при производстве изделий, работающих в жестких температурно-силовых условиях – при температурах, достигающих $0,85T_{пл}$ основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов. На базе их создана новая область материаловедения конструкционных материалов – наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов. Наиболее перспективными направлениями применения технологий, основанных на реакционном механическом легировании, в области материаловедения являются: 1) высокопрочные материалы для деталей машин, инструментальной оснастки и изделий различного функционального назначения, работающих в жестких температурно-силовых условиях; 2) порошки для газотермического напыления и покрытия из них; 3) нанокристаллические модифицирующие лигатуры и модификаторы. Приведены результаты промышленного внедрения

Ключевые слова: механическое легирование, теория, технология, структурные и фазовые превращения, дисперсное упрочнение, наноструктурные материалы, состав, структура, свойства

Для цитирования. Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 34–42.

G. F. Lovshenko

Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Belarus

NANOSTRUCTURAL MECHANICALLY ALLOYED DISPERSION STRENGTHENED MATERIALS BASED ON METALS

Abstract. Development of modern industries requires creation of new materials, which have, along with special properties, high strength and heat resistance. The most difficult is the provision of the latter. To increase it, it is necessary to reduce the amount of free movement of dislocations to a maximum permissible value, localize movement of defects of the crystal structure within the grain (subgrain), minimize the runoff of defects of the crystal structure at grain boundaries, exclude intergranular sliding, which can be successfully realized in dispersion-hardened materials. To obtain them, a promising technology is based on the reaction mechanical alloying. The article presents the results of the author's work, which made it possible to establish the regularities in the formation of phase composition, structure and properties at all stages of obtaining mechanically alloyed dispersed-hardened materials based on metals, which are the basis for the production of basic structural alloys-aluminum, copper, iron and nickel. These alloys are used for products operating under severe temperature-strength conditions – at temperatures reaching $0.85T_{ml}$ of the substrate. They have tensile strength 1.2–1.5 times higher than that of analogues, and on their basis a new area of materials science of structural materials was created – nanostructured mechanically alloyed dispersed-hardened materials based on metals. The most promising areas of application of technologies based on reaction mechanical alloying in the field of materials science are: 1) high-strength materials for machine parts, tooling and products of various functional purposes operating under severe temperature and force conditions; 2) powders for gas-thermal spraying and coating of them; 3) nanocrystalline modifying ligatures and modifiers. The results of industrial introduction are given – two small-scale enterprises for the production of import-substituting science-intensive products were created.

Keywords: mechanical alloying, theory, technology, structural and phase transformations, dispersion strengthening, nanostructural materials, compound, structure, properties

For citation. Lovshenko G. F. Nanostructural mechanically alloyed dispersion strengthened materials based on metals. *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. 1, pp. 34–42 (in Russian).

Введение. Развитие современных отраслей промышленности, включающих как общее машиностроение, так и моторо-, турбино-, авиа-, приборостроение, ядерную энергетику и др., требует создания новых материалов, обладающих не только специальными свойствами, но и высокой прочностью и жаропрочностью. Наиболее сложным в создании необходимого комплекса свойств является обеспечение жаропрочности. Максимальная температура эксплуатации классических (литых) жаропрочных сплавов не превышает $0,6T_{пл}$ основы, что обусловлено ростом и растворением упрочняющих фаз интерметаллидов и развитием межзеренного скольжения и диффузии. Для исключения этих негативных явлений необходимо уменьшить до предельно допустимого значения величину свободного перемещения дислокаций, локализовать передвижение дефектов кристаллического строения в пределах зерна (субзерна), минимизировать сток дефектов кристаллического строения на границы зерен, исключить межзеренное скольжение. Эти условия могут быть реализованы в дисперсно-упрочненных материалах, представляющих собой матрицу из металла (сплава), в которой равномерно распределены дисперсные частицы упрочняющей фазы, стойкой против коагуляции и роста при температурах, превышающих $0,95T_{пл}$ основы.

Для эффективного повышения прочности как при низких, так и при высоких температурах материалы должны иметь фрагментированную структуру с максимально развитой поверхностью границ зерен и субзерен, стабилизированную наноразмерными включениями упрочняющих фаз. Наиболее перспективной будет структура, близкая к агрегатному типу. Она может быть получена при реализации технологии, основанной на реакционном механическом легировании, которое заключается в обработке в энергонапряженной мельнице-механореакторе шихты. В процессе обработки происходит механически активируемое взаимодействие между компонентами, вызывающее образование упрочняющих фаз. По общепринятой классификации, основанной на физических свойствах частиц, материалы относятся к наноструктурным.

В данной статье представлены результаты работы автора [1–6] по установлению закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных материалов и созданию на их основе новой области материаловедения конструкционных материалов, работающих при температурах, достигающих $0,85T_{пл}$ основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов, – наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов, а также показаны перспективные области их применения.

Результаты получены в научной школе профессора Ф. Г. Ловшенко (Белорусско-Российский университет, г. Могилев), воспитанником которой является автор данной работы. Школа была создана по инициативе академика НАН Беларуси О. В. Романа, большой вклад в становление и развитие ее внесли научные учреждения НАН Беларуси: Физико-технический институт, Институт порошковой металлургии, Институт технологии металлов, а также лично академики НАН Беларуси П. А. Витязь, С. А. Астапчик, А. И. Гордиенко, В. В. Клубович и Е. И. Марукович.

Методика исследования, материалы и оборудование. Реакционное механическое легирование, являющееся разновидностью механического легирования, заключается в обработке в энергонапряженной мельнице-механореакторе шихты, состоящей из порошков матричного металла либо сплава и компонентов, способных реагировать с основой или между собой с образованием упрочняющих фаз. В качестве исходных компонентов используются стандартные порошки металлов и соединений. Методика выбора исходного состава шихты базируется на предположении, что специальные свойства материалов (электрическое сопротивление, плотность, коррозионная стойкость и др.) могут быть получены введением элементов, традиционно применяющихся в классическом материаловедении, а высокие прочность и жаропрочность – комплексным легированием элементом, обладающим высоким сродством к O, S или N, с одной стороны, и соединением, содержащим O, S или N, – с другой. При этом во втором случае в процессе реализации технологии имеет место взаимодействие между легирующими компонентами, приводящее к образованию термодинамически стабильных упрочняющих фаз.

Существенным отличием технологии, основанной на реакционном механическом легировании, от традиционной (литье) является то, что исходная шихта и конечный продукт имеют близкий химический состав.

Основные этапы изготовления материалов по данной технологии следующие: выбор исходных компонентов и прогнозирование фазового состава материалов; обработка шихты в механореакторе – получение наноструктурной дисперсно-упрочненной гранулированной композиции; холодное прессование гранулированной композиции; отжиг холоднопрессованных брикетов; получение компактного полуфабриката деформационно-термической обработкой брикета. Наиболее важным этапом является реакционное механическое легирование, базирующееся на положениях механохимии. Согласно им механическая энергия, так же как и тепловая, при определенных условиях активирует структурные и фазовые превращения, получившие название «механохимические». Механически активируемые процессы, протекающие на этой стадии, формируют фазовый состав и структуру композиций, в значительной мере наследуемых материалом на последующих этапах их переработки в полуфабрикаты.

Эффективными аппаратами для промышленного синтеза дисперсно-упрочненных металлических композиций являются энергонагруженные вибромельницы инерционного типа, производительность которых в 1,3–1,6 раза выше, затраты энергии на единицу продукции в 1,4–1,7 раза ниже, а надежность и долговечность в 3–5 раз выше, чем у традиционно применяемых атриторов.

Проведенные автором настоящей статьи теоретические и экспериментальные исследования носят фундаментальный характер и выполнены с применением методик, приборов и оборудования, которые используются в современном материаловедении.

Результаты исследования. Формирование гранулированной композиции в общем случае описывается следующей схемой. При обработке порошковой шихты в механореакторе параллельно протекают процессы накопления дефектов кристаллического строения, вызывающего разрушение частиц, и последующая сварка осколков. Сварке предшествуют адгезия и агломерация. Последняя вызвана в основном ван-дер-ваальсовыми и электростатическими силами и получает развитие прежде всего в местах контакта свежих поверхностей. Ударное воздействие на агломерированную частицу вызывает холодную сварку, сопровождающуюся диффузией. В результате многократно повторяющихся разрушения и сварки формируется гранулированная композиция, в которой исходные компоненты или продукты их взаимодействия связаны и равномерно распределены между собой. На начальном этапе обработки, как правило, превалирует разрушение, в последующем – процессы агломерации и сварки, вследствие протекания которых средний размер гранул непрерывно увеличивается. На определенном этапе между процессами разрушения и сварки устанавливается динамическое равновесие, в результате которого средний размер гранул стабилизируется. Продуктом механического легирования является гранулированная композиция со средним размером гранул 25–500 мкм (рис. 1), зависящим от природы матричного металла и состава сплава с гомотенным и равномерным распределением легирующих элементов (рис. 2).

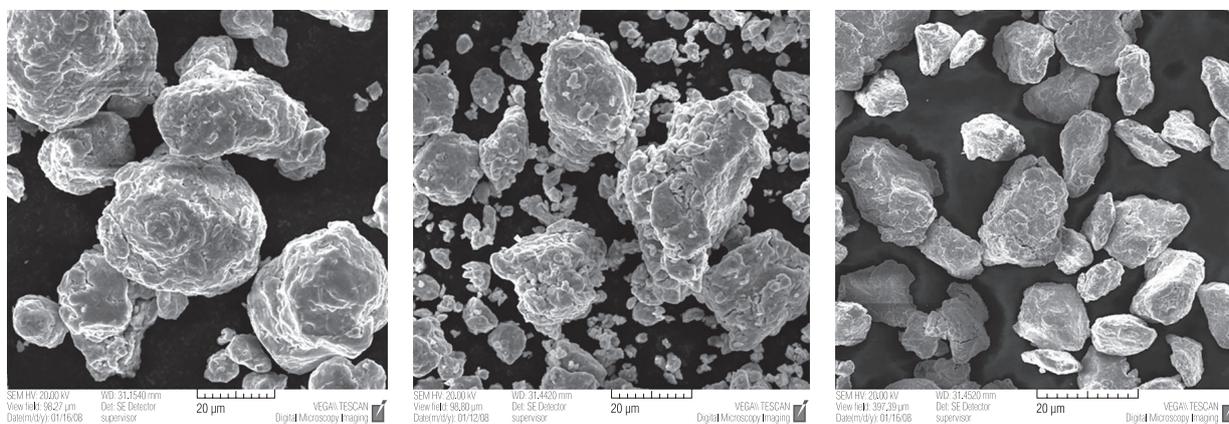


Рис. 1. Форма и размер механически легированных гранул
Fig. 1. The shape and size of mechanically doped granules

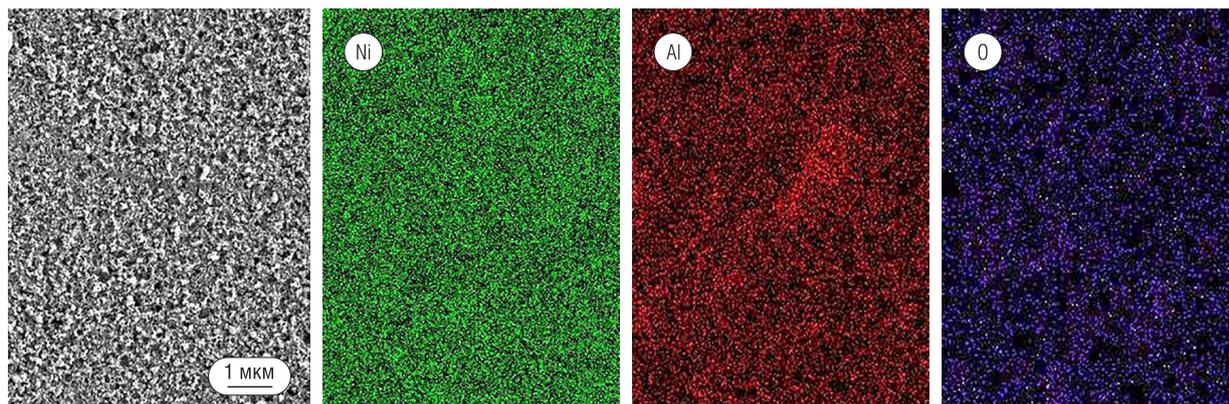


Рис. 2. Микроструктура и распределение элементов в гранулированной композиции «Ni–Al (3 %)»

Fig. 2. Microstructure and distribution of elements in a granular composition “Ni–Al (3 %)”

При реакционном механическом легировании получают развитие только фазовые превращения, уменьшающие свободную энергию системы и вызывающие образование твердых растворов и соединений. Для моделирования конечного фазового состава материалов приемлем термодинамический анализ равновесных процессов. Скорость и полнота протекания однотипных реакций возрастают с уменьшением значения энергии Гиббса взаимодействия между компонентами. Однако фазовый состав механически легированных композиций, как правило, является неравновесным.

Инициирование и протекание механически активируемых превращений происходит по двум механизмам: первый (изотермический) обусловлен неравновесной деформационно-ускоренной диффузией, протекающей при лобовом ударе; второй (тепловой) имеет место при скользящем ударе и вызывает повышение температуры до значений, превышающих 1000 °С.

Для получения дисперсно-упрочненных материалов перспективными являются комплексно-легированные композиции системы «основа – соединение, содержащее O, C, N в комплексе или в отдельности, – элемент, имеющий высокое сродство к O, C, N». В качестве второго компонента эффективно использование ряда оксидов, карбонатов, нитратов, органических соединений, обладающих низкой термодинамической стабильностью. В этих системах имеет место механически активируемое взаимодействие, вызывающее образование термодинамически стабильных оксидов, карбидов, нитридов, интерметаллидов. В комплексно-легированных композициях для достаточно полного протекания механически активируемого взаимодействия между легирующими компонентами по меньшей мере один из них должен обладать достаточно высокой растворимостью в основе.

Независимо от типа системы механически легированные композиции являются наноструктурными термодинамически неравновесными дисперсно-упрочненными материалами, структура основы которых формируется по механизму динамической рекристаллизации, включающему этапы: накопление дислокаций до максимально возможной плотности ($\rho \geq 10^{12} \text{ см}^{-2}$), их перестройку и образование фрагментированной субструктуры, превращение фрагментов в кристаллиты. Структура основы представляет собой неомогенный твердый раствор и относится к субмикроструктурному типу с размером зерен $\leq 100 \text{ нм}$, разделенных на блоки $\leq 50 \text{ нм}$; плотностью дислокаций $10^{10}–10^{11} \text{ см}^{-2}$, расположенных по границам зерен и субзерен, стабилизированных наноразмерными включениями ($d < 5 \text{ нм}$) механически синтезированных соединений, представляющих собой квазикластеры и находящиеся, как правило, в рентгеноаморфном состоянии.

Стабилизация фазового состава, структуры и свойств и дегазация механически легированных композиций происходит при отжиге, который может быть совмещен с термомеханической обработкой. Механически легированные композиции находятся в наклепанном, предельно упрочненном состоянии, и оптимальной технологией переработки их в компактный материал является горячее прессование с большой степенью пластической деформации – экструзия. Основными задачами этого процесса являются: получение полуфабрикатов с плотностью, близкой к теоретической, необходимого сечения и размеров, а также формирование устойчивой дислокационной субструктуры, стабилизированной дисперсными включениями упрочняющей фазы, обеспечивающей высокую жаропрочность материала.

Термическое воздействие на механически легированные композиции сопровождается термодинамически разрешенными превращениями, приближающими фазовый состав к равновесному. Основными из них являются: рост зерен основы, уменьшение градиента концентрации твердого раствора при переходе от одного зерна к другому, кристаллизация механически синтезированных аморфных фаз, взаимодействие между сохранившимися компонентами или промежуточными продуктами их механохимических превращений и др. Кинетику протекания термически активируемых превращений определяют особенности строения механически легированных композиций, основными из которых являются: активированное состояние реагирующих компонентов, вызванное их высокой дисперсностью и дефектностью кристаллического строения; большая суммарная площадь поверхности частиц реагирующих веществ; наличие непосредственного контакта между реагентами, обусловленного ювенильным состоянием их поверхностей; короткие (несколько десятков атомных параметров) диффузионные пути атомов реагентов. Данные факторы создают условия для протекания превращений по кинетике, близкой к бездиффузионной. Этому также способствует высокоразвитая поверхность границ зерен и субзерен, блокированная наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз, которая является препятствием (барьером) для межкристаллитной диффузии, в результате чего она получает развитие в пределах зерна (блока). Наличие диффузионного барьера в виде границ зерен и субзерен обуславливает существенную разницу в фазовом составе и строении соседних зерен. Это явление определяет также высокую термическую стабильность фаз, не имеющих когерентной связи с основой, в том числе и включений исходных компонентов.

Материалы, полученные по оптимальной технологии, независимо от природы матричного металла имеют микрокристаллический тип структуры основы (рис. 3), стабилизированной наноразмерными включениями упрочняющих фаз, и относятся к наноструктурным дисперсно-упро-

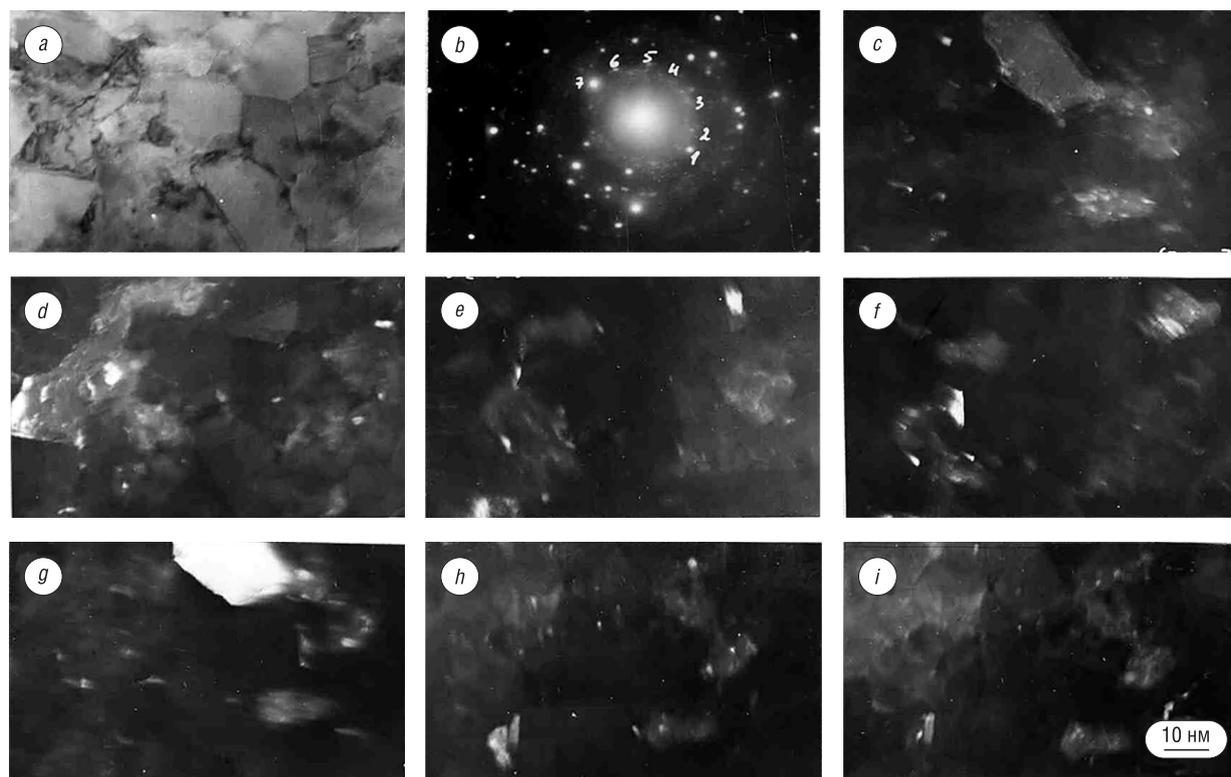


Рис. 3. Микроструктура сплава, полученного из композиции «Al–CuO (6,26 %)»: *a* – светлое поле; *b* – микроэлектроннограмма. ПЭМ; *c–i* – темное поле в рефлексах фаз: Al + α -Al₂O₃ (*c*); Al + Cu₉Al₄ + α -Al₂O₃ (*d*); γ' -Al₂O₃ (*e*); Al + Cu₉Al₄ (*f*); Al + χ -Al₂O₃ (*g*); Al + Al₄C₃ (*h*); AlN (*i*)

Fig. 3. The microstructure of the alloy obtained from the composition “Al–CuO (6.26 %)”: *a* – bright field; *b* – microelectronogram. TEM; *c–i* – dark field in phase reflexes: Al + α -Al₂O₃ (*c*); Al + Cu₉Al₄ + α -Al₂O₃ (*d*); γ' -Al₂O₃ (*e*); Al + Cu₉Al₄ (*f*); Al + χ -Al₂O₃ (*g*); Al + Al₄C₃ (*h*); AlN (*i*)

ченными материалами. Структура характеризуется следующими параметрами: размер зерен ≤ 500 нм, размер блоков ≤ 100 нм, плотность дислокаций 10^9 – 10^{10} см $^{-2}$, размер термодинамически стабильных включений оксидов ≤ 20 нм, карбидов, нитридов, интерметаллидов – ≤ 100 нм.

Длительное термическое воздействие при температурах до $0,85T_{пл}$ основы материалов не обеспечивает достижения фазового равновесия. Фазовый состав материалов отличается от равновесного наличием зерен и групп зерен основы с разной концентрацией легирующих компонентов в твердом растворе и неравновесных соединений, а также отдельных включений ($d \leq 0,1$ мкм) исходных компонентов. Это обусловлено блокировкой наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз границ зерен и субзерен, являющихся препятствием (барьером) для межкристаллитной диффузии. Структура и фазовый состав материалов, полученных по технологии, основанной на механическом легировании, характеризуется высокой стойкостью против длительного термического воздействия при температурах, достигающих $0,85T_{пл}$ основы (рис. 4).

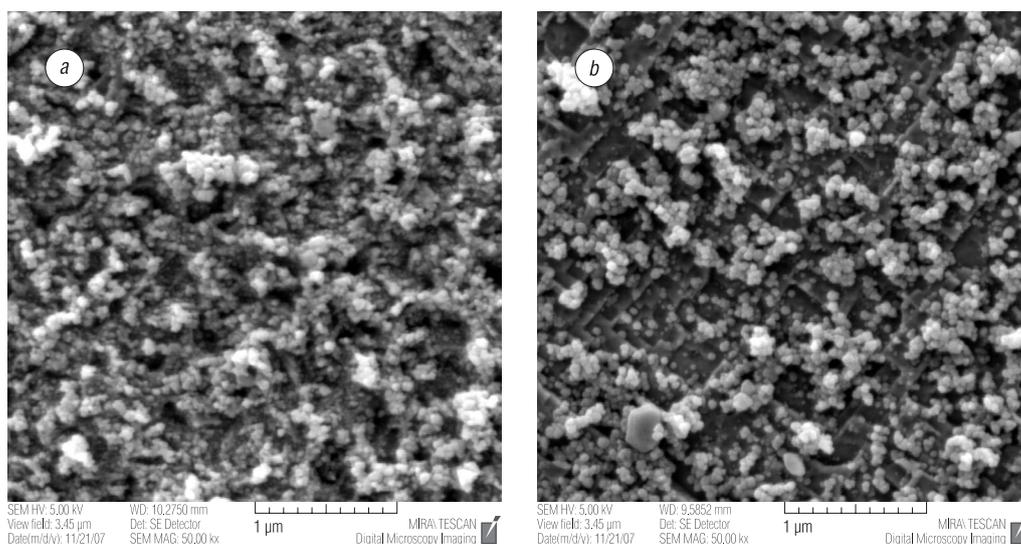


Рис. 4. Структура компактного материала, полученного из композиции «Ni – Al (3 %)»: *a* – исходная, *b* – после отжига при 1200 °C в течение 5 ч. СЭМ

Fig. 4. The structure of a compact material obtained from the composition “Ni – Al (3 %)”, *a* – initial, *b* – after annealing at 1200 °C for 5 hours. SEM

Основное упрочнение механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных материалов обусловлено наличием высокоразвитой поверхности границ зерен и субзерен, стабилизированной наноразмерными включениями термодинамически стабильных фаз, имеющих высокое значение модуля сдвига. Зернограничному упрочнению сопутствует «внутризеренное» дисперсное и в большинстве случаев дисперсионное.

Технология, основанная на реакционном механическом легировании, обеспечивает получение наноструктурных дисперсно-упрочненных алюминиевых, медных, железных и никелевых материалов различного функционального назначения, в том числе и со специальными свойствами, по прочности и жаропрочности в 1,2–1,5 раза превосходящих аналоги.

Практическое применение результатов работы. Установлены универсальные закономерности, зависимости и механизмы протекания механически и термически активируемых фазово-структурных превращений на всех технологических этапах получения механически легированных материалов из порошковых композиций систем «основной металл – легирующий металл», «основной металл – легирующий оксид – легирующий металл» на основе широко применяемых в машиностроении металлов – Fe, Ni, Al и Cu. Эти закономерности являются научной базой для разработки технологических процессов получения материалов с требуемым комплексом физико-механических свойств и создания инновационного мелко- и среднесерийного производства механически легированных дисперсно-упрочненных материалов различного функционального назначения и изделий из них.

Наиболее перспективными в области материаловедения направлениями применения технологий, основанных на реакционном механическом легировании, являются: 1) высокопрочные материалы для деталей машин, инструментальной оснастки и изделий различного функционального назначения, работающих в жестких температурно-силовых условиях; 2) порошки для газотермического напыления и покрытия из них; 3) нанокристаллические модифицирующие лигатуры и модификаторы.

Оптимизированы состав и технологические условия получения ряда **жаропрочных материалов** ($t_{\text{нач. рекр.}} \geq 0,7T_{\text{пл}}$ основы) различного назначения на основе Al, Cu, Fe и Ni.

Алюминиевые материалы (лабораторная технология): высокопрочные ($\sigma_B \geq 750$ МПа, $\sigma_B^{500} \geq 220$ МПа); с низким значением коэффициента линейного расширения ($\alpha = (17-18) \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$ и $\sigma_B \geq 500$ МПа, а $\sigma_B^{300} \geq 230$ МПа); низкой плотности ($\rho \leq 2,4$ г/см 3 и $\sigma_B \geq 600$ МПа); с содержанием до 40 % бора (эффективное сечение захвата тепловых нейтронов до 290 барн и $\sigma_B \geq 350$ МПа); антифрикционные на основе Al–Pb ($\sigma_B \geq 380$ МПа).

Медные материалы электротехнического назначения и изделия из них (среднесерийное производство): электропроводность 0,7–0,8 % от электропроводности меди, $t_{\text{нач. рекр.}} \geq 750$ °C, 200–270 НВ, $\sigma_B = 750-950$ МПа.

Стали (лабораторная технология) с $t_{\text{нач. рекр.}} \geq 750-950$ °C, по твердости в 1,5–2,7 и пределу прочности в 1,4–2,2 раза превышающие аналоги, например 15X11MФ (54 HRC, $\sigma_B = 1380-1410$ МПа), 15X18H9 (46 HRC, $\sigma_B = 1120-1140$ МПа).

Никелевые сплавы (лабораторная технология) с $t_{\text{нач. рекр.}} \geq 1000-1050$ °C, по прочности в интервале температур 20–900 °C в 1,3–1,7 раза превосходят аналоги (литые дисперсионно-упрочненные сплавы ХН77ТЮ и ХН70ВМТЮ); по основным показателям не уступают, а в ряде случаев превосходят дисперсно-упрочненные материалы ВДУ-1, ВДУ-2, ТД-никель и DS-никель, ТД-нихром, изготовленные из дисперсных порошков, полученных химическими методами.

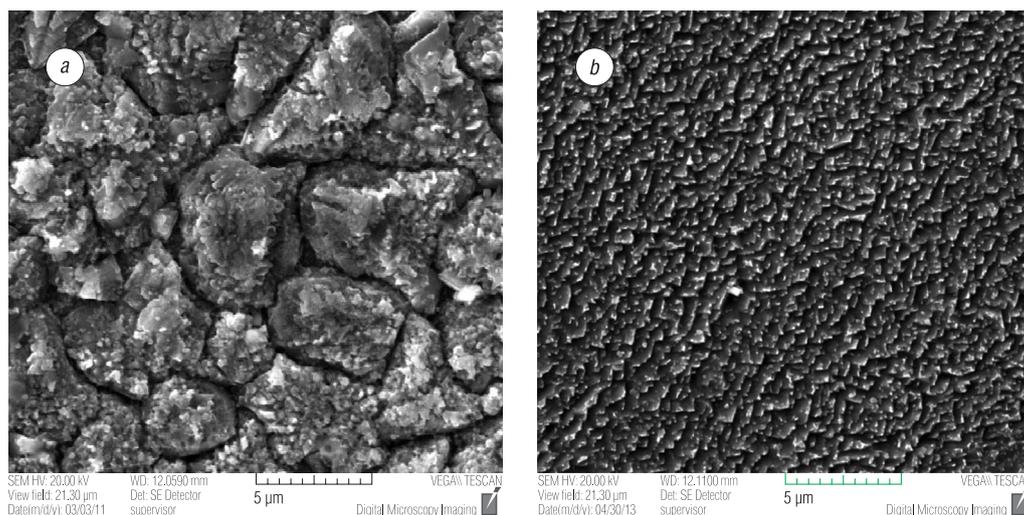
Порошки для газотермического напыления и покрытия из них (промышленная технология, среднесерийное производство). Оптимизированные составы шихты по базовым элементам механически легированные композиционные порошки на основе железа примерно соответствовали сталям X, X3, X6, X9, 20X2H4, 20X18H10T, а также железоалюминиевому сплаву (30 % Al); на основе никеля – сплавам ПН95Ю5, ПН85Ю15, ПХ20Н80, ПХ20Н75Ю5.

Покрытия на основе металлов наследуют субмикроструктурный тип структуры основы композиционных порошков и имеют комплексное упрочнение, сочетающее твердорастворное, зернограничное, дисперсионное и дисперсное и определяющее их высокую износостойкость и жаропрочность в широком интервале температур, верхнее значение которых превышает $0,7T_{\text{пл}}$ основы. По прочности сцепления с основой, твердости и износостойкости в условиях трения скольжения с ограниченной смазкой плазменные покрытия из механически легированных порошков в 1,3–1,7 раза превосходят аналоги.

Созданные композиционные металлокерамические порошки относятся к системе $\text{Al}_2\text{O}_3\text{--TiO}_2\text{--Ni--Al}$. Отличительной особенностью покрытий из разработанных порошков является наличие стабилизированных наноразмерными включениями $\text{Ni}_3(\text{Al}, \text{Ti})$ прослоек никеля, окаймляющих зерна оксидов, что повышает вязкость и устраняет основной недостаток материалов на основе керамики – высокую хрупкость, вызывающую разрушение покрытия в процессе эксплуатации.

Нанокристаллические модифицирующие лигатуры и модификаторы (промышленная технология, среднесерийное производство). Для производства бронз применялась механически легированная лигатура систем Cu–Cr–C–O и Cu–Cr–Zr–C–O, полученная по оптимальной технологии в виде горячепрессованных прутков и имеющая медную основу суб-, /микроструктурного типа ($d_{\text{зерна}} \leq 1$ мкм) с глобулярными включениями хрома размером менее 0,5 мкм, а также синтезированных нанокристаллов, представляющих собой оксиды Cr_2O_3 , ZrO_2 , карбиды ZrC , Cr_2C_6 , интерметаллид Cu_3Zr и выполняющих роль основных модификаторов, вызывающих после полного цикла обработки полуфабрикатов уменьшение зерна основы разработанных материалов по сравнению с базовыми в 15–25 раз (рис. 5).

Применение механически легированных модифицирующих лигатур, изготовление которых осуществляется на недорогом оборудовании и отличается простотой, экологической безопасностью и универсальностью, позволяет:

Рис. 5. Структура бронзы БрХ: *a* – классическая, *b* – экспериментальнаяFig. 5. Structure of cast bronze BrX: *a* – classical, *b* – experimental

исключить из технологии получения хромовых бронз высокотемпературный, требующий специального дорогостоящего печного оборудования, экологически опасный процесс изготовления литых лигатур, а также холодную пластическую деформацию отливок и полученных из них полуфабрикатов;

снизить на 50–100 °С оптимальную температуру процесса легирования расплава меди и уменьшить в 2,5–3,5 раза его продолжительность, а также исключить из технологии холодную пластическую деформацию (со степенью 60 %) закаленных полуфабрикатов, что существенно упрощает и удешевляет процесс получения хромовых бронз, расширяет область их применения.

Бронзы, выплавленные с применением механически легированных лигатур по разработанной технологии и подвергнутые оптимальной термической обработке, имеют медную основу субмикроструктурного типа ($d_{\text{зерна}} = 0,1\text{--}0,2$ мкм) с включениями нанокристаллов хрома, а также оксидов Cr_2O_3 , ZrO_2 и карбидов ZrC , Cr_{23}C_6 . В отличие от дисперсионно упрочненных базовых бронз для разработанных характерно комплексное упрочнение, сочетающее зернограничное, дисперсионное и дисперсное. Это приводит к повышению их физико-механических свойств: твердости – на 20 %, предела прочности при растяжении – на 5 %, электропроводности – на 20 % и температуры начала рекристаллизации – на 10 %, что обеспечивает увеличение стойкости изделий в 1,8–2,2 раза.

Применение механически легированных наноструктурных модифицирующих лигатур приводит к измельчению структуры и повышению физико-механических свойств литых серых чугунов. Так, модифицирование чугуна сплавом, полученным из механически синтезированной композиции «алюминий – углерод (6 %)», приводит к уменьшению длины и увеличению толщины графитовых включений. Причем по сравнению с модифицированием алюминием количество эвтектических ячеек в единице поверхности в этом случае повышается в 1,65 раза, что оказывает существенное влияние на механические свойства материала.

Созданные технологии получения материалов и изделия из них могут быть использованы на предприятиях металлургического и машиностроительного профилей.

Результаты работы широко представлялись на престижных международных выставках и форумах как в ближнем, так и дальнем зарубежье (США, Южная Корея, Китай, Германия, Румыния, Россия, Украина и др.), отмечены многочисленными дипломами и награждены пятью серебряными и двумя золотыми медалями.

Для промышленного внедрения результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ на базе Белорусско-Российского университета (Могилев, Беларусь) создано два малотоннажных предприятия по выпуску импортозамещающей наукоемкой продукции. Результаты исследований представлены в многочисленных научных публикациях и учебно-методических разработках.

Заключение. На основе установленных закономерностей формирования фазового состава, структуры и свойств на всех этапах получения механически легированных наноструктурных дисперсно-упрочненных алюминиевых, медных, железных и никелевых материалов создана новая область материаловедения конструкционных материалов для работы при температурах, достигающих $0,85T_{пл}$ основы, с пределом прочности при растяжении в 1,2–1,5 раза выше, чем у аналогов, – наноструктурные механически легированные дисперсно-упрочненные материалы на основе металлов.

Список использованных источников

1. Витязь, П. А. Механически легированные сплавы на основе алюминия и меди / П. А. Витязь, Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск: Беларус. наука, 1998. – 352 с.
2. Ловшенко, Г. Ф. Теоретические и технологические аспекты создания наноструктурных механически легированных материалов на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2005. – 276 с.
3. Ловшенко, Г. Ф. Наноструктурные механически легированные материалы на основе металлов / Г. Ф. Ловшенко, Ф. Г. Ловшенко Б. Б. Хина; под ред. Ф. Г. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2008. – 679 с.
4. Ловшенко, Ф. Г. Наноструктурные механически легированные материалы на основе никеля / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Минск: БНТУ, 2012. – 297 с.
5. Ловшенко, Ф. Г. Композиционные наноструктурные механически легированные порошки для газотермических покрытий / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2013. – 215 с.
6. Ловшенко, Ф. Г. Закономерности формирования фазового состава, структуры и свойств механически легированных материалов / Ф. Г. Ловшенко, Г. Ф. Ловшенко. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2016. – 420 с.

References

1. Vityaz P. A., Lovshenko F.G., Lovshenko G.F. *The mechanically alloyed aluminum-based alloys and copper*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 1998. 352 p. (in Russian).
2. Lovshenko G. F., Lovshenko F.G. *Theoretical and technological aspects of nanostructured mechanically alloyed materials metals-based*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2005. 276 p. (in Russian).
3. Lovshenko G. F., Lovshenko F. G., Khina B.B. *Nanostructured mechanically alloyed materials based on metals*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2008. 679 p. (in Russian).
4. Lovshenko F. G., Lovshenko G.F. *Nanostructured materials are mechanically alloyed nickel-based*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2012. 297 p. (in Russian).
5. Lovshenko F. G., Lovshenko G.F. *Composite nanostructure mechanically alloyed powders for thermal coatings*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2013. 215 p. (in Russian).
6. Lovshenko F. G., Lovshenko G.F. *Laws of formation of structure and size distribution of mechanically alloyed materials*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2016. 420 p. (in Russian).

Информация об авторе

Ловшенко Григорий Федорович – доктор технических наук, профессор, ректор Белорусской государственной академии авиации (ул. Уборевича, 77, 220096, Минск, Республика Беларусь). E-mail: greg-lovshenko@mail.ru

Information about the author

Gregory F. Lovshenko – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector of the Belarusian State Academy of Aviation (77, Ubovovich Str., 220096, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: greg-lovshenko@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

УДК 531.781.2

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017**И. В. Качанов, В. В. Власов***Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь***ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА НАГРУЖЕНИЯ ПРИ СКОРОСТНОМ УДАРНОМ
ВЫДАВЛИВАНИИ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛОСКОСТУПЕНЧАТЫХ СТЕРЖНЕВЫХ
ИЗДЕЛИЙ**

Аннотация. Приводится физико-механическая модель, разработанная для расчета силового воздействия на пуансон при скоростном ударном выдавливании биметаллических ступенчатых стержневых изделий в условиях плоской деформации. Для решения поставленной задачи процесс ударного нагружения заготовки разделяется на две стадии – разгона и торможения. На стадии разгона принимается линейная зависимость на графике $P_n(h_n)$ «усилие на пуансоне – путь деформирования». Для стадии торможения приводится методика расчета усилия, действующего на пуансон, при пластическом течении биметаллической заготовки в ступенчатую сужающую полость с тремя очагами деформации. На основе метода верхней оценки для случая пластического течения на завершающем этапе процесса через очаги деформации получено уравнение для расчета усилия, действующего на пуансон. Путем решения задачи в квазистатической постановке (действие динамических напряжений на поверхностях разрыва скорости и сил инерции не оказывает влияние на вид и форму построенных годографов скоростей и ускорений), исходя из условия минимальной мощности пластического формоизменения, были установлены зависимости для расчета оптимальных углов матричной полости $\alpha_{\text{опт}}$, $\beta_{\text{опт}}$, $\gamma_{\text{опт}}$, зависящих от вытяжки λ и коэффициента трения μ . Применение матриц с оптимальными углами конусности позволит реализовать процесс ударного скоростного выдавливания с минимальной нагрузкой, действующей на пуансон. На основе разработанной модели в рамках принятых допущений получено уравнение для расчета минимального верхнеграницного усилия $P_{n,\text{min}}$, действующего на пуансон при ударном скоростном пластическом течении металлов через очаги деформации. В уравнении представлены реологические характеристики деформируемой основной части заготовки (k , ρ), технологические параметры (λ_1 , λ_2 , λ_3 , V), коэффициенты контактного трения μ для различных участков поверхности матричной полости, значения соударяющихся масс пуансона и заготовки.

Разработанная модель расчета оптимального силового режима и уравнение (17) вполне могут быть использованы в инженерной практике для разработки технологии скоростного ударного выдавливания плоскоступенчатых биметаллических изделий различного назначения.

Ключевые слова: биметаллы, деформирование, обработка давлением, скоростное горячее выдавливание, метод верхней оценки, условие баланса мощности внешних и внутренних сил

Для цитирования. Качанов, И. В. Оптимизация режима нагружения при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий / И. В. Качанов, В. В. Власов // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 43–52.

I. V. Kachanov, V. V. Vlasov*Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus***LOADING REGIME OPTIMIZATION FOR HIGH-SPEED IMPACT EXTRUSION OF BIMETALLIC FLAT-STEP
ROD PRODUCTS**

Abstract. The work presents a physicomechanical model developed for calculating the force action on the punch with high-speed impact extrusion of bimetallic stepped rod products under conditions of plane deformation. In order to obtain the result, the process of impact loading of the workpiece is divided into two stages – acceleration and braking. At the acceleration

stage, a linear dependence on the graph $P_n(h_n)$ “force on the punch – the deformation line” is adopted. For the braking stage, a procedure is given for calculating the force acting on the punch with the plastic flow of the bimetallic workpiece in a stepped narrowing cavity with three deformation centers. Based on the method of upper evaluation for the case of plastic flow at the final stage of the process, an equation is derived for calculating the force acting on the punch through deformation centers. By solving the problem in a quasistatic formulation (the action of dynamic tensions on the surfaces of velocity discontinuity and inertia forces does not affect the type and shape of the velocity and acceleration hodographs constructed), starting from the condition of the minimum power of plastic shaping, the dependences for calculating the optimum angles of the matrix cavity $\alpha_{\text{опт}}$, $\beta_{\text{опт}}$, $\gamma_{\text{опт}}$ depending on the stretching λ and the coefficient of friction μ were determined. The use of a matrix with the optimum taper angles will allow us to realize the process of high-speed impact extrusion with minimum load acting on the punch. On the basis of the developed model, an equation for calculating the minimum upper force $P_{n,\text{min}}$ acting on the punch under high-speed impact plastic flow of metals through the deformation centers was obtained within the framework of the adopted assumptions. The equation presents the rheological characteristics of the deformed main part of the workpiece (k , ρ), technological parameters (λ_1 , λ_2 , λ_3 , V), contact friction coefficients μ for different parts of the surface of the matrix cavity, the impacting masses of the punch and the workpiece.

The developed model for calculating the optimal power regime and equation can be used in engineering practice to develop a technology for high-speed impact extrusion of flat-step bimetallic products for various purposes.

Keywords: Bimetals, deformation, pressure treatment, high-speed hot extrusion, upper evaluation method, condition of power balance of external and internal forces.

For citation. Kachanov I. V., Vlasov V. V. Loading regime optimization for high-speed impact extrusion of bimetallic flat-step rod products. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 43–52 (in Russian).

Введение. Современное развитие промышленного производства требует применения высокопроизводительных, энерго- и ресурсосберегающих технологий, обеспечивающих получение готовой продукции с высокими физико-механическими и эксплуатационными свойствами. В связи с этим большими потенциальными возможностями обладают техпроцессы, основанные на использовании высоких скоростей деформирования.

Такие процессы, к числу которых можно отнести и скоростное горячее выдавливание (СГВ), создают эффективные условия для обработки малопластичных и труднодеформируемых материалов, широко используемых в различных отраслях промышленности, включая инструментальное производство. Эффективность СГВ дополнительно возрастает при изготовлении би- и триметаллического стержневого инструмента (толкателей, пуансонов, фрез, прошивников и т. д.) в режиме высокотемпературной термомеханической обработки (ВТМО). В этом случае наряду с экономией дорогостоящих инструментальных сталей (до 90 %) обеспечивается дополнительное снижение трудовых и энергетических затрат на изготовление стержневого инструмента и происходит фиксация благоприятных изменений в микро- и тонкой структурах, вызванных высокой скоростью деформирования [1].

Однако для промышленного внедрения таких техпроцессов нужны сведения об оптимальных силовых режимах формоизменения, пиковых нагрузках, действующих на инструмент, что необходимо для расчета оптимальной энергии удара и подбора оборудования, способного развить данную энергию.

К сожалению, в настоящее время из-за отсутствия корректной теории расчета энергосиловых и кинематических параметров процесса СГВ возникают объективные трудности с прогнозированием режима нагружения работы оснастки и оборудования, что является сдерживающим фактором на пути промышленного внедрения высокоскоростных процессов металлообработки в различных отраслях промышленности.

На основании изложенного в данной работе предлагается методика расчета усилия, действующего на инструмент (пуансон) при скоростном ударном выдавливании биметаллических ступенчатых стержневых изделий в условиях плоской деформации.

Авторами производится теоретический анализ процесса скоростного ударного выдавливания плоскоступенчатых стержневых изделий из исходных составных заготовок. Процесс позволяет за один удар получить биметаллические стержневые изделия различного функционального назначения в режиме ВТМО. Однако отсутствие корректной теории не дает возможности прогнозировать силовой режим работы инструмента, сдерживает широкое промышленное внедрение процесса в производство.

Целью работы является разработка физико-математической модели, позволяющей в вариационной постановке установить влияние различных факторов (технологических, физико-механических) на силовой режим инструмента при скоростном ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий.

Расчетная модель процесса. Постановка и решение задачи. Основная суть технологии СГВ заключается в том, что нагретую биметаллическую заготовку, состоящую из основной части 1 (например, сталь 40Х) и запрессованной в нее рабочей части 2 (рис. 1) (высоколегированные штамповые стали ДИ23, 5ХНМ, 3Х2В8Ф и т. д.) выдавливают с высокой скоростью в штампе с разъемными полуматрицами.

При этом в процессе скоростного выдавливания в разъемных полуматрицах происходит удлинение (вытяжка) двух сопрягаемых разнородных материалов, протекающее в условиях всестороннего неравномерного сжатия и сопровождаемое синхронным формированием ювенильных сопрягаемых поверхностей в осевом направлении. Отмеченное удлинение сопрягаемых поверхностей, начиная с вытяжки $\lambda = 1,5-1,8$, сопровождается разрушением окисных и жировых пленок, что обеспечивает

при соответствующих температурно-скоростных режимах процесса формирование сварного соединения сопрягаемых разнородных материалов в осевом направлении (Патент Республики Беларусь № 18113, МКИ В 21 J 5/00 «Способ штамповки деталей со стержнем»). На завершающей стадии процесса, используя эффект отскока полуматриц из штампа в закалочную ванну, осуществляется мгновенная закалка поковки, обеспечивающая реализацию процесса в режиме ВТМО [2].

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачу, связанную с разработкой модели динамического взаимодействия пуансона с деформируемой заготовкой в условиях скоростного ударного выдавливания плоскоступенчатых стержневых изделий.

Для решения обозначенной задачи применим метод верхней оценки (МВО), основанный на использовании кинематически возможного поля (КВП), в котором вся область деформируемого материала разбивается на блоки. При этом принимается, что внутри блоков поля скоростей и ускорений являются однородными (диссипация мощности пластического формоизменения внутри блока равна нулю).

Для расчета усилия ударного выдавливания, действующего на пуансон I , используем КВП, состоящее из жестких однородных блоков 0, 1, 2, 3 ($1'$, $2'$, $3'$ ($1''$), $2''$, $3''$), в котором очаги деформации (ОД) находятся внутри треугольных блоков 2, $2'$, $2''$ (рис. 2, а). Следует отметить, что принятое для теоретического анализа КВП получено путем линейной аппроксимации криволинейных границ в действительном непрерывном поле линий скольжения, которое использовалось Н. Д. Тутышкиным [3] для анализа стационарного скоростного выдавливания полосы через клиновую матрицу с углом $2\alpha = 90^\circ$. Однако основными недостатками полученного решения при использовании непрерывного поля линий скольжения являются неучтенные действия динамических напряжений и сил инерции в деформируемой заготовке, а также высокая трудоемкость проведенного численного расчета. В то же время применение МВО позволяет устранить отмеченные недостатки, разработать решение в вариационной постановке, что повышает точность результатов и, как следствие, дает возможность их использования в инженерной практике при создании технологии скоростного ударного выдавливания ступенчатых стержневых изделий.

Для решения задачи примем следующие допущения: материал биметаллической заготовки несжимаемый, жестко-пластический, удовлетворяющий критерию текучести Губера – Мизеса; инструмент абсолютно жесткий, формирование очагов пластической деформации происходит при заполнении матричных воронок деформируемым металлом; вид полей линий скольжения не зависит от изменения скорости пуансона (квазистатическая задача) [1, 4, 5].

Величину усилия, действующего на пуансон I в процессе скоростного ударного выдавливания биметаллической ступенчатой стержневой детали, определим из условия баланса мощности внешних и внутренних сил. Причем действие последних будет рассматриваться последовательно, по мере заполнения очагов пластической деформации в блоках 2, $2'$, $2''$, что приведет к суммированию преодолеваемой нагрузки в процессе перемещения пуансона. С учетом сказанного

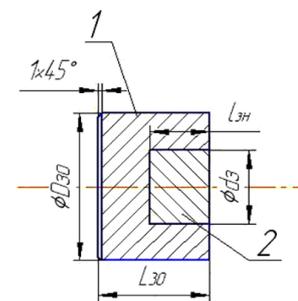


Рис. 1. Схема соединения основной (1) и рабочей (2) частей разнородных металлов в составной заготовке

Fig. 1. Connection diagram of the main (1) and working (2) parts of dissimilar metals in the composite workpiece

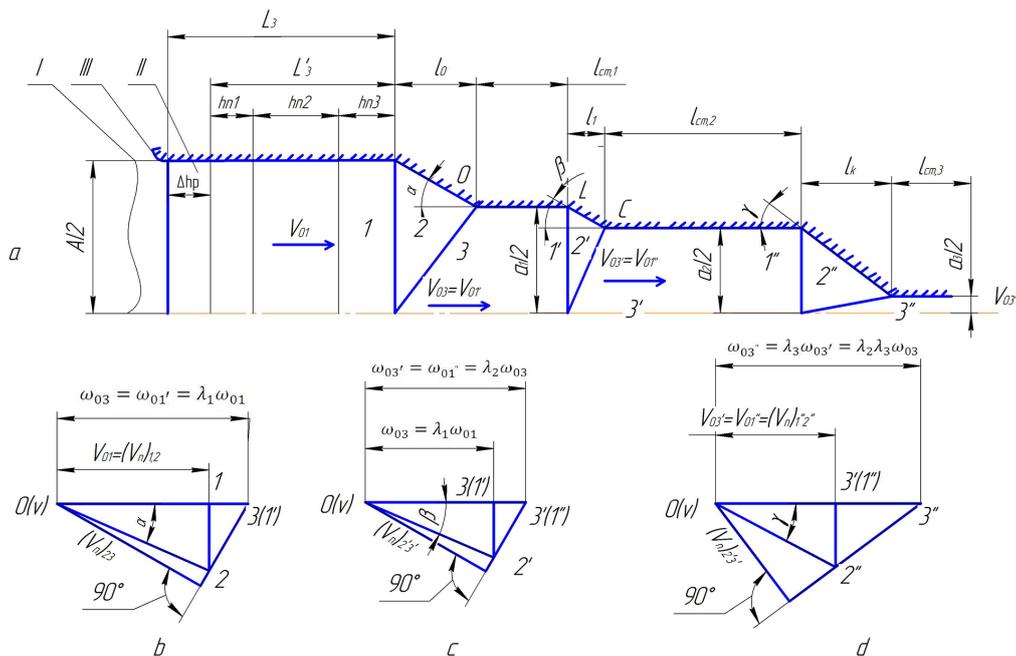


Рис. 2. Кинематически возможное поле линий скольжения (а) и соответствующие ему годографы скоростей (b, c, d) при скоростном ударном выдавливании ступенчатых плоских изделий

Fig. 2. The kinematically possible field of slip lines (a) and the corresponding velocity curves (b, c, d) for high-speed impact extrusion of stepped flat products

определим последовательно усилия, действующие на пуансон при формоизменении в очаге деформации 2, затем – в очагах деформации 2, 2' и в завершение – 2, 2', 2''.

Условие баланса мощности внешних и внутренних сил для всех случаев решаемой задачи имеет вид

$$W_{\text{п}} = W_{\text{с.с}} = W_{\text{соб}} + W_{\text{дин}} \pm W_{\text{ин}}, \tag{1}$$

где $W_{\text{п}}$ – мощность движущегося пуансона (мощность внешних активных сил); $W_{\text{с.с}}$ – суммарная мощность сил сопротивления; $W_{\text{соб}}$ – мощность собственных сил (внешних и внутренних) сопротивления деформируемой заготовки; $W_{\text{дин}}$ – мощность от действия динамических напряжений на поверхностях разрыва скоростей, $W_{\text{ин}}$ – мощность, обусловленная действием локальных сил инерции в деформируемой заготовке.

В выражении (1) мощность $W_{\text{ин}}$ имеет знакопеременные значения, что обусловлено ударным приложением нагрузки, при котором на начальной стадии процесса – стадии разгона локальные силы инерции деформируемой заготовки, вызванным разгоном масс металла в блоках 1, 2, 3, направлены против перемещения пуансона I . Поэтому на стадии разгона, наряду с пластической деформацией, некоторая часть мощности движущегося пуансона I расходуется на преодоление сопротивления от действия указанных сил.

На этой стадии, характеризуемой достаточно коротким значением пути деформирования Δh_p , происходит резкое нарастание усилия $P_{\text{п}}$, действующего на пуансон со стороны деформируемой заготовки практически по линейному закону. В конце стадии разгона (точка «b» на оси абсцисс на рис. 3, d) усилие, действующее на пуансон, достигает максимального значения в точке 1 (участок 01 графика $P_n(h_n)$ «усилие на пуансоне – путь деформирования»).

Величина мощности $W_{\text{ин}}$ на стадии разгона с учетом противоположенного действия сил инерции деформируемой заготовки противоположна по знаку мощности $W_{\text{п}}$ движущегося пуансона, и поэтому в выражении (1) для ударного процесса она берется со знаком плюс.

Для следующей стадии процесса – стадии торможения принимается, что выравнивание ускорения пуансона I и блока 1 деформируемой заготовки происходит практически мгновенно (точки 1 и 2 на рис. 3, d). Локальные силы инерции заготовки на этой стадии процесса изменяют

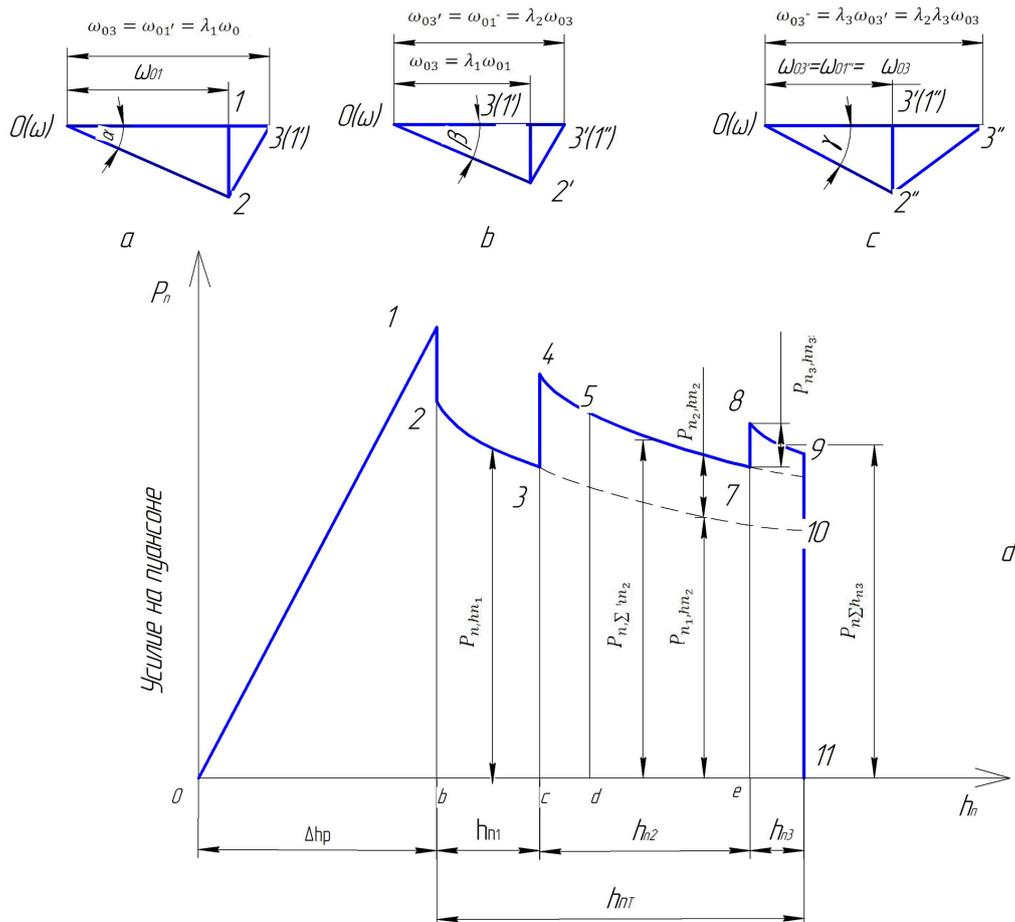


Рис. 3. Годографы ускорений (a, b, c) и силовая диаграмма $P_n = f(h_n)$, «усилие на пуансоне – путь деформирования» (d) при скоростном ударном выдавливании плоских ступенчатых изделий
 Fig. 3. Hodographs of accelerations (a, b, c) and the force diagram $P_n = f(h_n)$, “force on the punch – path of deformation” (d) with high-speed impact extrusion of flat step products

направление на противоположное и, действуя по ходу движения пуансона I , совершают работу, которая затрачивается на формоизменение заготовки.

В результате работы локальных сил инерции на стадии торможения происходит снижение мощности $W_{пн}$ движущегося пуансона.

Учитывая этот фактор силовой разгрузки пуансона, величина мощности $W_{ин}$ в выражении (1) на протяжении всего перемещения пуансона на стадии торможения берется со знаком минус.

Установим величины, входящие в уравнение (1). Мощность $W_{пн}$ движущегося со скоростью V_0 пуансона I определяется из уравнения

$$W_n = P_n V_0 = p_n A b V_0, \tag{2}$$

где P_n и p_n – соответственно усилие и удельное усилие, действующие на инструмент (пуансон I) со стороны заготовки II в условиях плоской деформации; A и b – соответственно высота и ширина плоской заготовки в плоскости, перпендикулярной направлению движения пуансона I (см. рис. 2, a).

Уравнение для расчета мощности $W_{собр}$ представим в виде

$$W_{собр} = W_{раз} + W_{тр}, \tag{3}$$

где $W_{раз}$ – мощность внутренних сил сопротивления, действующих на поверхностях разрыва скорости; $W_{тр}$ – мощность сил контактного трения (внешние силы сопротивления), действующих на поверхности контакта деформируемого материала и инструмента.

Мощность $W_{\text{раз}}$ в выражении (3) определяется по формуле

$$W_{\text{раз}} = \sum k l_{rs} b V_{rs}, \quad (4)$$

где k – постоянная пластичности деформируемого материала. Для биметаллической заготовки величина k принимается для материала основной части I , как имеющего более низкую температуру нагрева (за счет подстуживания на воздухе и в результате контакта, с матричной поверхностью) по сравнению с рабочей частью 2 (см. рис. 1); l_{rs} – длина границ между блоками r и s (r и s номера блоков в принятом КВП: $r = 0, 1, 2, 3, 2', 2''$; $s = 1, 2, 3, 3', 3''$; $r \neq s$); b – ширина границ скольжения в направлении, нормальном к движению пуансона; V_{rs} – разрыв скорости на граничной поверхности между блоками r и s ; по условию Губера – Мизеса $k = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}$ [6], где σ_s – предел текучести деформируемого материала, определяемый по результатам испытаний на растяжение (сжатие).

Мощность $W_{\text{тр}}$ рассчитывается по формуле

$$W_{\text{тр}} = \sum \tau_k l_{rs} b V_{rs}, \quad (5)$$

где τ_k – касательные напряжения, действующие на контактных поверхностях трения деформируемой заготовки и инструмента. По данным работы [4], выражение для расчета τ_k имеет вид: $\tau_k = 2\mu k$ (μ – коэффициент пластического трения, зависящий от условия формоизменения и состояния поверхности инструмента, $\mu = 0 \div 0,5$).

Учитывая (4) и (5), уравнение (3) примет вид

$$W_{\text{собщ}} = (1 + 2\mu k) \sum k l_{rs} b V_{rs}. \quad (6)$$

Согласно [4], скоростное пластическое течение частиц деформируемого материала через поверхность разрыва скорости сопровождается изменением их количества движения. Под действием импульса силы, вызванного указанным изменением количества движения, на поверхности разрыва скорости возникают динамические напряжения $(q_{\text{дин}})_{rs}$, определяемые из уравнения

$$(q_{\text{дин}})_{rs} = \rho (V_n)_{rs} V_{rs}, \quad (7)$$

где ρ – плотность деформируемого материала, $(V_n)_{rs}$ – нормальная к поверхности разрыва скорости компонента скорости (определяется по годографу скорости).

Выражение для расчета мощности $W_{\text{дин}}$, затраченной на преодоление динамических напряжений $(q_{\text{дин}})_{rs}$, имеет вид

$$W_{\text{дин}} = \rho (V_n)_{rs} V_{rs}^2 l_{rs} b. \quad (8)$$

Силы инерции $P_{\text{ин}}$, возникающие в блоках заготовки II (см. рис. 2, *a*) при ударном воздействии на нее пуансона I определяются из уравнения

$$P_{\text{ин}} = \sum m_i \omega_i, \quad (9)$$

где m_i – массы блоков $1, 2, 2', 2'', 3, 3', 3''$ в принятом КВП; ω_i – ускорение частиц металла в жестких блоках движущейся заготовки.

Учитывая выражение (9), уравнение для расчета мощности $W_{\text{ин}}$ принимает вид

$$W_{\text{ин}} = \sum m_i \omega_i V_i, \quad (10)$$

где V_i – скорость движения блоков $1, 2, 2', 2'', 3, 3', 3''$ в процессе деформации заготовки.

При расчетах составляющих мощности внутренних сил по уравнениям (3)–(10) используем КВП с годографами скоростей и ускорений (см. рис. 2, *a–d*, и 3, *a–c*). Построение годографов скоростей и ускорений проводилось по правилам графостатики для трех очагов пластической деформации, сосредоточенных в клиновых блоках $2, 2', 2''$.

Для определения усилия, действующего на пуансон в процессе плоского ударного выдавливания трехступенчатой поковки, необходимо с помощью параметров разрывного поля α, β, γ , размеров пуансона A , коэффициентов вытяжки $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ рассчитать границы блоков l_{rs} и установить соотношения между кинематическими параметрами точек деформируемой заго-

товки в очагах пластической деформации ($V_{rs}, (V_n)_{rs}, V_i, \omega_i$) и блока I (V_{01}, ω_{01}), а также определить массы блоков m_i . Значение вытяжек $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ определяются из очевидных соотношений: $\lambda_1 = \frac{A}{a_1}$; $\lambda_2 = \frac{a_1}{a_2}$; $\lambda_3 = \frac{a_2}{a_3}$ (a_1, a_2, a_3 – значения высоты продеформированной поковки после прохода очагов деформации 2, 2', 2'' соответственно).

Используя параметры поля α, β, γ и значения кинематических параметров ($V_{rs}, (V_n)_{rs}, V_i, \omega_i$), которые принимаются из годографов скоростей и ускорений, после преобразований получим выражения для расчета усилий: P_{n,hn_1}, P_{n,hn_2} и P_{n,hn_3} , действующих на пуансон I при перемещениях его на путях деформирования h_{n_1}, h_{n_2} и h_{n_3} соответственно (см. рис. 2, а). При этом следует отметить, что на участке h_{n_1} диаграммы $P_n(h_n)$ усилие P_{n,hn_1} будет зависеть от сопротивления деформированию, возникающего при скоростном пластическом течении заготовки II через очаг деформации, который сосредоточен в треугольных блоках 2 (см. рис. 2, а).

На участке перемещения пуансона h_{n_2} величина суммарного усилия $P_{n \sum hn_2}$ будет определяться синхронным суммарным сопротивлением деформированию со стороны двух очагов пластической деформации, сосредоточенных в треугольных блоках 2 и 2' (см. рис. 2, а).

На конечном этапе процесса ($h_n = h_{n_3}$) величину суммарного усилия, действующего на пуансон $P_{n \sum hn_3}$, будет характеризовать суммарное сопротивление деформированию, обусловленное синхронным пластическим течением заготовки II через три очага пластической деформации, сосредоточенных в треугольных блоках 2, 2', 2'' (см. рис. 2, а).

С учетом сказанного для третьего этапа процесса ($h_n = h_{n_3}$) величина $P_{n \sum hn_3}$ будет определяться выражением

$$P_{n \sum hn_3} = P_{n_1, hn_3} + P_{n_2, hn_3} + P_{n_3, hn_3}, \quad (11)$$

где $P_{n_1, hn_3}, P_{n_2, hn_3}$ и P_{n_3, hn_3} – усилия, действующие на пуансон I в результате сопротивления деформированию при пластическом течении металла через очаги пластической деформации, сосредоточенные в треугольных блоках 2, 2', 2'' соответственно.

Учитывая уравнения (3)–(10) и принимая во внимание, что ускорение пуансона $\omega_n = \frac{P_n}{M} (P_n -$ усилие действующее на пуансон, M – масса пуансона), уравнение (11) представим в виде

$$P_{n \sum hn_3} = \frac{AbM \left\{ k \left[F_1(\alpha, \mu, \lambda_1) + 4\mu \left(\frac{L'_3}{A} - \frac{h_{n_1} + h_{n_2} + h_{n_3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \left[F_2(\alpha) + (\lambda_1 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F_3(\alpha, \lambda_1) + \frac{L'_3}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n_1}}{A} - \frac{h_{n_1} + h_{n_2} + h_{n_3}}{A} \right]} +$$

$$\frac{AbM \left\{ k \left[F'_1(\beta, \mu, \lambda_2) + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 h_{n_1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n_2}}{A} \right) \right] + \lambda_1 \rho V_0^2 \left[F'_2(\beta) + (\lambda_2 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F'_3(\beta, \lambda_2) + \frac{\lambda_1^2 h_{n_1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n_2}}{A} \right]} +$$

$$\frac{AbM \left\{ k \left[F''_1(\gamma, \mu, \lambda_3) + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n_2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n_3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \left[F''_2(\gamma) + (\lambda_3 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F''_3(\gamma, \mu, \lambda_3) + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n_2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n_3}}{A} \right]}. \quad (12)$$

В выражении (12) функции $F_1(\alpha, \mu, \lambda_1), F_2(\alpha), F_3(\alpha, \lambda_1), F'_1(\beta, \mu, \lambda_2), F'_2(\beta), F'_3(\beta, \lambda_2), F''_1(\gamma, \mu, \lambda_3), F''_2(\gamma)$ и $F''_3(\gamma, \mu, \lambda_3)$ зависят от условий деформации (от значений коэффициентов вытяжки $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$, углов матричной воронки α, β, γ , условий контактного трения, определяемых коэффициентом трения μ). При этом в выражении (12) функции $F_1(\alpha, \mu, \lambda_1), F'_1(\beta, \mu, \lambda_2)$ и $F''_1(\gamma, \mu, \lambda_3)$ характеризуют статическую часть соответственно усилий $P_{n_1, hn_3}, P_{n_2, hn_3}$ и P_{n_3, hn_3} , обусловленную сопротивлением деформированию на контактных поверхностях и на поверхностях разрыва скоростей.

Функции $F_2(\alpha)$, $F_2'(\beta)$, $F_2''(\gamma)$ определяют динамическую часть усилий $P_{n_1, h_{n3}}$, $P_{n_2, h_{n3}}$ и $P_{n_3, h_{n3}}$, обусловленную повышением сопротивления деформирования за счет действия динамических напряжений на поверхностях разрыва скорости в очагах деформации ОД₁, ОД₂ и ОД₃.

Функции $F_3(\alpha, \lambda_1)$, $F_3'(\beta, \lambda_2)$, и $F_3''(\gamma, \lambda_3)$ характеризуют инерционную часть усилий $P_{n_1, h_{n3}}$, $P_{n_2, h_{n3}}$ и $P_{n_3, h_{n3}}$, обусловленную действием инерционных масс заготовки при ударном приложении нагрузки.

Для квазистатистической задачи (действие сил инерции и изменение скорости пластического течения не оказывают влияния на вид принятого КВП), принимая углы α , β , γ за переменные параметры и исследуя полученные функции $F_1(\alpha, \mu, \lambda_1)$, $F_1'(\beta, \mu, \lambda_2)$ и $F_1''(\gamma, \mu, \lambda_3)$ на экстремум, устанавливаются условия, когда мощность пластического формоизменения и усилие, действующее на инструмент, будут минимальны.

Для этого решается система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial W_{\text{соб1}}}{\partial \alpha} &= 0, \\ \frac{\partial W_{\text{соб2}}}{\partial \beta} &= 0, \\ \frac{\partial W_{\text{соб3}}}{\partial \gamma} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $\frac{\partial W_{\text{соб1}}}{\partial \alpha} = 0$, $\frac{\partial W_{\text{соб2}}}{\partial \beta} = 0$, $\frac{\partial W_{\text{соб3}}}{\partial \gamma} = 0$ – частные производные функционалов мощности сил собственного сопротивления, рассчитанных для ОД₁, ОД₂ и ОД₃ и зависящих от функций $F_1(\alpha, \mu, \lambda_1)$, $F_1'(\beta, \mu, \lambda_2)$ и $F_1''(\gamma, \mu, \lambda_3)$ соответственно.

В результате решения системы уравнений (13) были установлены значения оптимальных углов $\alpha_{\text{опт}}$, $\beta_{\text{опт}}$ и $\gamma_{\text{опт}}$ клиновой матрицы для скоростного ударного выдавливания биметаллических ступенчатых изделий:

$$\alpha_{\text{опт}} = \arcsin \sqrt{\frac{(\lambda_1 - 1)(\lambda_1 - 1 + 2\mu)}{[(\lambda_1 - 1)(\lambda_1 - 1 + 4\mu) + (\lambda_1 + 1)]}}; \quad (14)$$

$$\beta_{\text{опт}} = \arcsin \sqrt{\frac{(\lambda_2 - 1)(\lambda_2 - 1 + 2\mu)}{[(\lambda_2 - 1)(\lambda_2 - 1 + 4\mu) + (\lambda_2 + 1)]}}; \quad (15)$$

$$\gamma_{\text{опт}} = \arcsin \sqrt{\frac{(\lambda_3 - 1)(\lambda_3 - 1 + 2\mu)}{[(\lambda_3 - 1)(\lambda_3 - 1 + 4\mu) + (\lambda_3 + 1)]}}. \quad (16)$$

В выражениях (14), (15), (16) λ_1 , λ_2 , λ_3 – коэффициенты вытяжки в очагах деформации ОД₁, ОД₂ и ОД₃ соответственно; μ – коэффициент контактного трения ($\mu \leq 0,5$) на поверхностях матричной полости, по которым перемещается деформируемый материал [8–10].

Подставляя полученные значения оптимальных углов $\alpha_{\text{опт}}$, $\beta_{\text{опт}}$ и $\gamma_{\text{опт}}$ в уравнение (12), получаем возможность для расчета минимального усилия $P_{n\Sigma h_{n3} \min}$, действующего на пуансон на 3-м этапе процесса, когда $h_n = h_{n3}$:

$$P_{n\Sigma h_{n3}} = \frac{AbM \left\{ k \left[F_{1\text{опт}} + 4\mu \left(\frac{L_3'}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \left[F_{2\text{опт}} + (\lambda_1 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F_{3\text{опт}}' + \frac{L_3'}{A} + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} - \frac{h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}}{A} \right]} +$$

$$\frac{AbM \left\{ k \left[F_{1\text{опт}}' + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right) \right] + \lambda_1 \rho V_0^2 \left[F_{2\text{опт}}' + (\lambda_2 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F_{3\text{опт}}' + \frac{\lambda_1^2 h_{n1}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} \right]} \quad (17)$$

$$\frac{AbM \left\{ k \left[F''_{1\text{опт}} + 4\mu \left(\frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right) \right] + \rho V_0^2 \lambda_1^2 \lambda_2^2 \left[F''_{2\text{опт}} + (\lambda_3 - 1)^2 \right] \right\}}{M + \rho A^2 b \left[F''_{3\text{опт}} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 h_{n2}}{A} + \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 h_{n3}}{A} \right]}$$

Аналогичным образом определяются нагрузки, действующие на пуансон, при $h_n = h_{n1}$ и $h_n = h_{n2}$, что нашло отражение на силовой диаграмме $P_n(h_n)$ (см. рис. 3, d)

Анализ системы уравнения уравнений (17) показывает, что в числителе каждого из трех уравнений представлена квазистатистическая часть усилия, обусловленная действием внешних и внутренних сил сопротивления на поверхностях трения и разрыва скорости. Второе слагаемое в числителе в квадратных скобках характеризует повышение нагрузки на пуансон за счет динамических напряжений, действующих на поверхностях разрыва скорости. Выражение в знаменателе во всех трех уравнениях определяют снижение усилия на пуансон, обусловленное в значительной мере действием инерционной силы, величина которой возрастает пропорционально массе выдавленной стержневой части изделия.

Учитывая то обстоятельство, что задача ударного выдавливания решена на основе использования оптимальных параметров поля $\alpha_{\text{опт}}$, $\beta_{\text{опт}}$ и $\gamma_{\text{опт}}$, то полученная зависимость (17) является достаточной корректной, так как позволяет определить минимальное усилие, действующее на пуансон, за счет оптимизации значения функций $F_{1\text{опт}}$, $F'_{1\text{опт}}$, $F''_{1\text{опт}}$, $F_{2\text{опт}}$, $F'_{2\text{опт}}$, $F''_{2\text{опт}}$, $F_{3\text{опт}}$, $F'_{3\text{опт}}$, $F''_{3\text{опт}}$.

С учетом изложенного уравнение (17), вполне может быть использовано для расчета оптимального силового режима работы инструмента при ударном выдавливании биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий, в том числе инструментального назначения.

Заключение. Разработана математическая модель и предложена расчетная диаграмма $P_n(h_n)$ – «усилие на пуансоне – путь деформирования», отражающие режим нагружения ударного скоростного выдавливания биметаллических плоскоступенчатых стержневых изделий в матричной полости с различными коэффициентами вытяжки λ_1 , λ_2 , λ_3 . Путем решения квазистатической задачи в вариационной постановке исходя из условия минимальной мощности пластического формоизменения получены уравнения для расчета оптимальных углов матричной воронки $\alpha_{\text{опт}}$, $\beta_{\text{опт}}$ и $\gamma_{\text{опт}}$, зависящих от вытяжки λ и коэффициента трения μ . Использование матриц с оптимальными углами конусности позволит реализовать процесс ударного скоростного выдавливания с минимальной нагрузкой, действующей на пуансон. На основе разработанной модели в рамках принятых допущений получено уравнение (17), которое полностью отражает реальные условия ударной деформации биметаллической заготовки, когда происходит пластическое течение металлов через три очага деформации $ОД_1$, $ОД_2$ и $ОД_3$. В нем представлены реологические характеристики деформируемой основной части заготовки (k , ρ), условия формоизменения (μ , λ_1 , λ_2 , λ_3 , V), а также значения соударяющихся масс пуансона и заготовки. Разработанная модель расчета и уравнение (17) вполне могут быть использованы в инженерной практике для прогнозирования оптимального силового режима работы инструмента при разработке технологии скоростного ударного выдавливания плоскоступенчатых биметаллических стержневых изделий различного назначения.

Список использованных источников

1. Качанов, И. В. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий / И. В. Качанов; под ред. Л. А. Исачевича. – Минск: Технопринт, 2002. – 327 с.
2. Качанов, И. В. Ресурсосберегающая технология скоростного горячего выдавливания биметаллического стержневого инструмента / И. В. Качанов, В. Н. Шарий, В. В. Власов // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 1. – С. 3–8
3. Тутышкин, Н. Д. Соотношение на разрывах при динамической плоской деформации / Н. Д. Тутышкин // Технология машиностроения. – Тула, 1972. – Вып. 29 – С. 56–66.
4. Томленов, А. Д. Теория пластического деформирования металлов / А. Д. Томленов. – М.: Металлургия, 1972. – 408 с.
5. Сторожев, М. В. Теория обработки металлов давлением / М. В. Сторожев, Е. А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

6. Сегал, В. М. Технологические задачи теории пластичности / В. М. Сегал. – Минск: Наука и техника, 1977. – 254 с.
7. Ренне, И. П. Учет сил инерции при плоском выдавливании полосы через клиновые матрицы / И. П. Ренне, Н. Д. Тутьшкин // Изв. высш. учеб. заведений. Машиностроение. – 1972. – № 6. – С. 144–147.
8. Работнов, Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела / Ю. Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 654 с.
9. Скоростное горячее выдавливание стержневых изделий с плакированием торцевой части / И. В. Качанов [и др.]. – Минск: БНТУ, 2011. – 198 с.
10. Качанов, И. В. Определение усилия в процессе ударного выдавливания плоских стержневых изделий / И. В. Качанов, О. М. Дьяконов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2002. – № 1. – С. 77–81.

References

1. Kachanov I. V., Isaevych L. A. (ed.). *High-speed hot extrusion of rod products*. Minsk, Technoprint Publ., 2002. 327 p. (in Russian).
2. Kachanov I. V., Shary V. N., Vlasov V. V. Resource-saving technology of high-speed hot extrusion of a bimetallic bar tool. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2016, vol. 15, no. 1, pp. 3–8 (in Russian). DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-1-3-8
3. Tutyshkin N. D. Ratio at discontinuities under dynamic planar deformation. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of Mechanical Engineering]. Tula, 1972, Issue 29, pp. 56–66 (in Russian).
4. Tomlenov A. D. *Theory of plastic deformation of metals*. Moscow, Metallurgy Publ., 1972. 408 p. (in Russian).
5. Storozhev M. V., Popov E. A. *Theory of metal working with pressure*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 423 p. (in Russian).
6. Segal V. M. *Technological problems of the theory of plasticity*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1977. 254 p. (in Russian).
7. Renne I. P., Tutyshkin N. D. The calculation of inertia forces in the flat extrusion of a strip through wedge matrices. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Mashinostroenie = Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 1972, no. 6, pp. 144–147 (in Russian).
8. Rabotnov Yu. N. *Mechanics of a deformable solid body*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 654 p. (in Russian).
9. Kachanov I. V., Zdor G. N., Isaevich L. A., Sharii V. N. *High-speed hot extrusion of core products with cladding of the end part*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2011. 198 p. (in Russian).
10. Kachanov I. V., Dyakonov O. M. Determination of the force in the process of impact extrusion of flat rod products. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2002, vol. 1, pp. 77–81 (in Russian).

Информация об авторах

Качанов Игорь Владимирович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Кораблестроение и гидравлика», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь)

Власов Вячеслав Владимирович – инженер кафедры «Кораблестроение и гидравлика», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vlasov881988@gmail.com

Information about the authors

Igor V. Kachanov – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department “Shipbuilding and hydraulics”, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus)

Viacheslav V. Vlasov – Engineer of the Department “Shipbuilding and hydraulics”, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosty Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vlasov881988@gmail.com

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 532.61:544.72

Поступила в редакцию 20.10.2017
Received 20.10.2017

А. Я. Григорьев

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

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Аннотация. Процессы, протекающие при контакте твердых тел, отличаются своим многообразием, зависимостью от масштаба рассматриваемой области и значений действующих сил. Изучение таких процессов требует комплексного подхода к приборному и методическому обеспечению проводимых исследований. Для установления механизмов, протекающих в нанометровых зазорах между телами, разработан прибор для измерения межмолекулярных и капиллярных сил, описана его конструкция и принцип работы. Представлены технические решения для измерения сил трения при малых нагрузках и определения субмикронных величин износа. Описаны методы изучения действующих при фрикционном взаимодействии механизмов изнашивания по морфологии частиц износа и локальных повреждений поверхностей трения. Изложены методы описания их текстуры и формы, позволяющие визуализировать сходство и различие анализируемых объектов. Рассмотрены методы диагностики и оценки текущего состояния узлов трения, основанные на классификации по морфологическим типам повреждений поверхностей и фрагментов их разрушений. Приведен метод оценки параметрической эквивалентности натуральных и лабораторных испытаний на трение и износ, позволяющий сравнивать данные, полученные в разных условиях, и устанавливать причину их расхождения. Возможности метода продемонстрированы на примере оценки действующих факторов космического пространства в рамках планируемого эксперимента по изучению трения на Международной космической станции.

Ключевые слова: приборы, адгезия, трение, износ, поверхности трения, частицы, трибоиспытания, космическая трибология

Для цитирования. Григорьев, А. Я. Приборы и методы исследований контактного взаимодействия твердых тел / А. Я. Григорьев // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 53–67.

A. Ya. Grigoriev

V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Science of Belarus, Gomel, Belarus

DEVICES AND METHODS OF INVESTIGATIONS OF CONTACT INTERACTION OF SOLIDS

Abstract. The processes occurring in the contact of solids differ in their variety, their dependence on the scale of the region under consideration and the values of the acting forces. The study of such processes requires a comprehensive approach to the instrumental and methodological support of research. To establish the mechanisms that take place in nanometer gaps between solids, an instrument for measuring intermolecular and capillary forces has been developed; its design and operating principle have been described. Technical solutions for measuring frictional forces at low loads and measuring submicron wear values are presented. The methods for studying wear mechanisms at friction with terms of the morphology of wear particles and local damage of friction surfaces are described. The methods of diagnostics and estimation of the current state of friction units based on the classification of surface damages and fragments of their fractures by morphological types are considered. A method of estimating the parametric equivalence of full-scale and laboratory tests for friction and wear is given, which opens the possibility of comparing the data obtained under different conditions and establishing the cause of their discrepancy. The capabilities of the method are demonstrated by an example of acting space factors estimation in the framework of the planned experiment on friction study at the International Space Station.

Keywords: devices, adhesion, friction, wear, friction surface, wear particles, tribotesting, space tribology

For citation. Grigoriev A. Ya. Devices and methods of investigation of contact interaction of solids. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnich navuk = Proceedings of the National Academy of Science of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 53–67 (in Russian).

Введение. Практически все процессы передачи энергии в машинах и механизмах протекают при контактном взаимодействии их деталей. Расширение диапазона скоростей и нагрузок, при которых работают эти детали, как в области сверхмалых, так и больших величин, потребовало

решения новых задач по обеспечению их функциональности. Так, с появлением сверхточных механических и электромеханических гироскопов, сервомеханики накопителей на жестких магнитных дисках, устройств микро- и нанопозиционирования, микроэлектромеханических систем возникла проблема обеспечения работоспособности подобных устройств из-за влияния межмолекулярного притяжения поверхностей их деталей [1]. Это, в свою очередь, потребовало измерения сил, действующих в малых зазорах субмиллиметровых деталей контактов и узлов трения, решения проблемы смазки и уменьшения сил адгезии между ними.

Эксплуатация узлов трения в условиях низкой или высокой температуры, при больших давлениях и в открытом космическом пространстве невозможна без изучения влияния на фрикционное взаимодействие комплекса экстремальных факторов [2]. В силу экстремальности проведение имитационных испытаний по всему комплексу таких факторов не всегда возможно, что требует поиска методических решений обеспечения параметрической эквивалентности результатов лабораторных испытаний и натурального поведения трибосистем. Сходная проблема возникает и при масштабировании результатов триботехнических исследований [3].

Значительные трудности в изучении механизмов контактного взаимодействия вызывает то, что зона их протекания недоступна для средств объективного контроля. Сложившаяся в настоящее время практика исследований в данной области основана на методах анализа морфологии поверхностей трения и частиц износа [4]. Классификация частиц и поверхностей по морфологическим видам позволяет устанавливать характер протекания процессов деградации трибосистем, оценивать их текущее состояние и решать диагностические задачи. Развитие вычислительной техники и методов обработки изображений позволяет уйти от субъективных методов принятия решений, однако требует разработки представительных способов описания морфологии шероховатых поверхностей и частиц износа.

Решение этих и многих других подобных задач невозможно без создания адекватной приборной базы и соответствующих методик исследований. В данной работе рассмотрены приборы и методы, созданные в отделе трибологии Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси для изучения механизмов контактного взаимодействия на крайних значениях шкал размеров исследуемых объектов, действующих между ними сил и значений внешних условий.

Измерение поверхностных сил. Измерение аттракционного взаимодействия реальных объектов является одной из наиболее сложных экспериментальных задач. Малые значения сил и расстояний, на которых они проявляются, выдвигают целый ряд специфических требований к измерительной аппаратуре. Первые успешные измерения, инициированные развитием теории молекулярного взаимодействия твердых тел, были проведены в середине 1950-х годов [5, 6]. Поскольку основной целью этих экспериментов являлась проверка теории, то после ее верификации интерес к соответствующим методикам значительно снизился, возобновившись вновь лишь в связи с развитием прецизионной техники, микромеханики и нанотехнологий. Решение практических задач в этой области потребовало детальных исследований аттракционного взаимодействия технических поверхностей.

Представление о технических поверхностях как о молекулярно-гладкой однородной фазе далеки от действительности – они шероховаты, негомогенны, на них всегда присутствуют пленки различной природы, электрические заряды, участки с остаточной намагниченностью. Поэтому при исследовании технических объектов практически невозможно выделить отдельные компоненты адгезионного взаимодействия и последнее определялось как результат действия всех аттракционных сил. Естественно ожидать, что значения работы адгезии для таких поверхностей будут существенно выше, чем для ювенильных.

Первые эксперименты по измерению притяжения реальных объектов были осуществлены с помощью динамометра с силоизмерителем на основе емкостного датчика [5]. Метод заключался в определении минимального расстояния устойчивого равновесия между силой притяжения двух твердых тел и упругим сопротивлением плоских пружин известной жесткости, на которых эти тела были закреплены. Результаты, полученные Б. В. Дерягиным с сотрудниками, основывались на использовании горизонтальных весов с отрицательной обратной связью [6]. В дальнейшем этот подход с различными вариациями применялся многими исследователями.

В настоящее время большинство экспериментальных исследований по изучению поверхностных сил осуществляется с помощью AFM и SFA. Измерения с помощью AFM проводятся по схеме, идентичной предложенной Дж.-Т. Овербеком и М.-Дж. Спарнаем [5]. Сила взаимодействия измеряется между образцом и иглой с радиусом закругления, составляющим несколько десятков нанометров, закрепленной на упругой консоли с известной жесткостью. Анализ формы кривых подвода-отвода позволяет определить силу адгезии в системе «игла – поверхность» и упругие свойства материала. Разработанный Я.-Н. Израелашвили и Д. Тэйбором поверхностно-силовой прибор SFA [7] в свою очередь является развитием схемы весов с обратной связью, предложенных И. И. Абрикосовой и Б. В. Дерягиным [6].

Для измерений молекулярного взаимодействия технических поверхностей в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси разработан адгезиометр, основанный на использовании схемы вертикальных торсионных весов с отрицательной обратной связью [8]. Измерительная часть контактного адгезиометра представляет собой вертикально расположенную рамку 1 (рис. 1, а), подвешенную на струне 2. На одном плече рамки расположен держатель пробного тела 3, на втором плече – постоянный магнит 4, помещенный между полюсами электромагнита 5. К рамке крепится зеркало 6, отражающее пучок света от источника 7 на фотоприемник 8. При силовом воздействии на пробное тело 3 рамка 2 с зеркалом 6 поворачивается, изменяя количество света, падающего на фотоприемник 8. Сигнал с фотоприемника поступает в электронный блок 9, который регистрирует и изменяет ток в катушке электромагнита 5 до значения, обеспечивающего обратный поворот рамки 1 в исходное равновесное положение. Таким образом, любое изменение действующих на пробное тело сил компенсируется соответствующим изменением тока в катушке электромагнита 5, обеспечивая неизменное положение рамки. Ток в катушке 5 прокалиброван, что в итоге позволяет измерить действующие силы между пробным телом и образцом 10, расположенным на столике 11.

Столик 11 перемещается винтовой парой 12 с помощью шагового двигателя 13 или вращением ручки 14. Точное перемещение производится пьезоэлементом 15, путем подачи на его обкладки напряжения от блока 9. Блок 9 соединен с компьютером 16, осуществляющим контроль процесса измерения и регистрации информации.

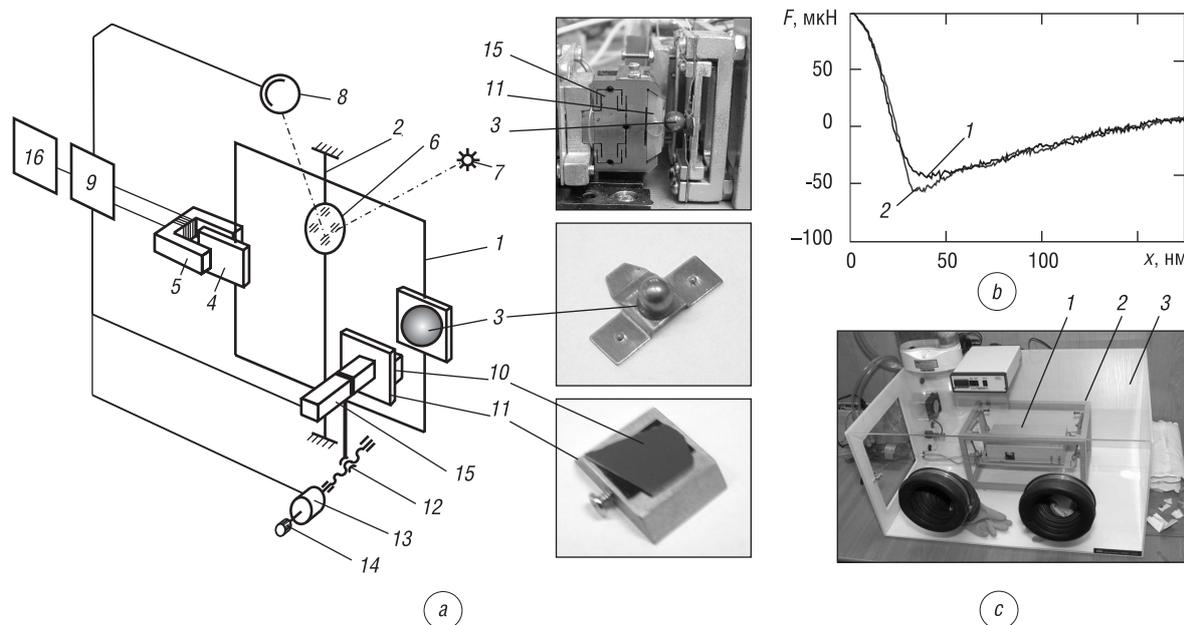


Рис. 1. Измерение поверхностных сил: а – принципиальная схема прибора, б – характерная зависимость силы межмолекулярного взаимодействия поверхностей от расстояния между ними, в – общий вид установки (обозначения см. по тексту)

Fig. 1. Measurement of surface forces: а – schematic diagram, б – typical force-distance dependencies of intermolecular interaction of surfaces, в – general view of the device (the tags explained in text)

Таблица 1. Рабочие характеристики адгезиометра

Table 1. Operating parameters of adhesion meter

Параметр	Значение
Диапазон измеряемых сил, мкН	$10^1 \div 10^4$
Диапазон перемещений образца, нм	$10^1 \div 10^4$
Размеры образца, мм, не более	$20 \times 20 \times 5$
Размер пробного тела (сфера), мм	$0,2 \div 5$

В исходном положении образец и пробное тело (шарик) находятся на расстоянии, исключающем их взаимное влияние друг на друга. Пьезоэлемент 15 «растянут» (на него подано максимальное электрическое напряжение), и в этом положении ток, протекающий в катушке электромагнита 5, принимается равным нулевой силе взаимодействия образцов. Далее образец 10 с помощью шагового двигателя 13 подводится к пробному телу до достижения заданной по условиям эксперимента начальной контактной нагрузки. Измерительный цикл начинается по достижении требуемой нагрузки или после заданного времени выдержки путем отвода образца 10 с помощью пьезоэлемента 15. В процессе отвода сила взаимодействия образцов меняется, рамка 2 поворачивается, что соответствующим образом компенсируется током в катушке электромагнита 5. По достижении заданного расстояния между шариком и образцом, цикл измерений проводится в обратной последовательности – при сближении образца и шарика. Результатом эксперимента являются две зависимости (рис. 1, *b*), характеризующие силовое взаимодействие при отводе 1 и подводе 2 образца к пробному телу.

Для защиты от вибраций прибор 1 размещался на платформе, подвешенной на четырех упругих элементах в рамке 2 (рис. 1, *c*). Вся эта конструкция помещалась в камеру контроля влажности 3. Основные характеристики прибора приведены в табл. 1.

Данный прибор позволил оценить эффективность применения мономолекулярных покрытий в качестве аналога граничных смазок для прецизионных малогабаритных узлов трения и развить представления о механизмах трения фрикционных пар при нагрузках, соизмеримых с силами адгезионного взаимодействия [9]. Важным результатом в области исследования контактного взаимодействия твердых тел явилось решение с помощью данного прибора задачи дифференциации вкладов в адгезионное взаимодействие капиллярного эффекта и ван-дер-ваальсовых сил, которое выполнил О. Ю. Комков [10]. Впервые были получены данные о соотношении этих составляющих при разных температурах в области контакта (рис. 2).

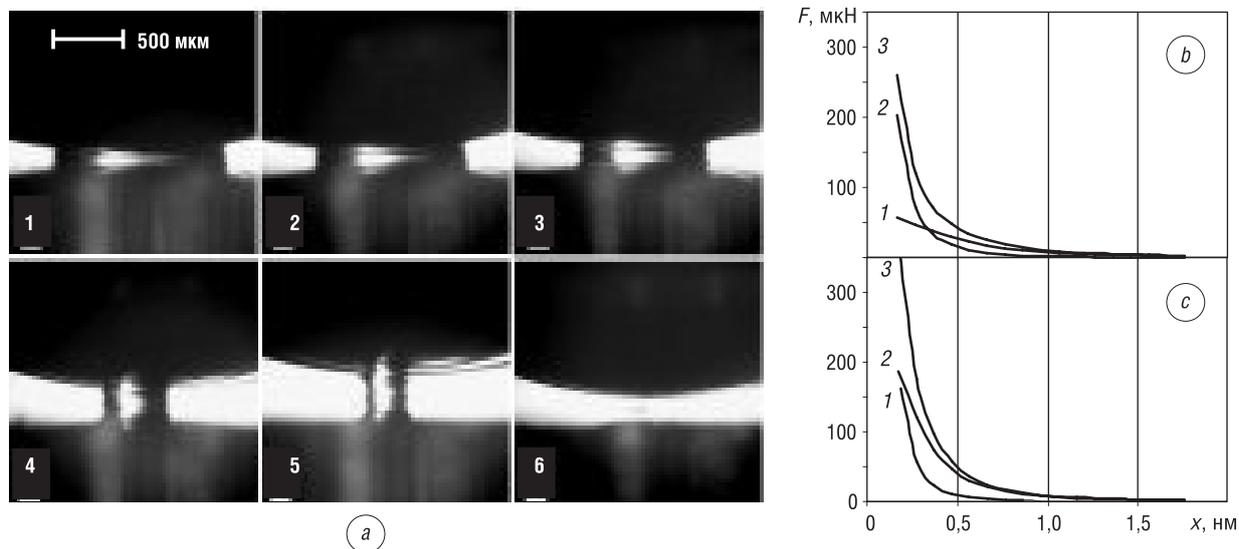


Рис. 2. Исследования капиллярных сил: *a* – стадии (1–6) изменения формы мениска между сферой и плоской поверхностью при увеличении расстояния между ними; *b*, *c* – дифференциальные зависимости сил приконтактного взаимодействия поверхностей при различной температуре: 32,4 °C (*b*) и 48,8 °C (*c*); 1 – капиллярные силы, 2 – межфазное взаимодействие поверхностей на воздухе, 3 – сумма сил 1 и 2

Fig. 2. Capillary forces investigation: *a* – stages (1–6) of the change in the shape of the meniscus between the sphere and the flat surface with increasing distance between them; *b*, *c* – differential dependencies of near contact interaction of surfaces at different temperatures: 32.4 °C (*b*) and 48.8 °C (*c*); 1 – capillary forces, 2 – interphase interaction of surfaces on air, 3 – sum of forces 1 and 2

Оценка сил трения при малых нагрузках. Измерение сил трения при нагрузках, характерных для прецизионного контакта, – от единиц до нескольких сотен микроньютонов – имеет ряд особенностей из-за влияния сил межмолекулярного взаимодействия поверхностей. При трении из-за неоднородности свойств поверхностных слоев эти силы могут резко изменяться, что может приводить к кратным изменениям нормальной нагрузки и сил трения (рис. 3). Фактически это делает невозможным изучение процессов трения в данном диапазоне нагрузок.

Как показывают эксперименты, для того чтобы это влияние было несущественным, нормальная нагрузка должна быть приблизительно на два порядка выше значений сил межмолекулярного взаимодействия. В настоящее время приборы, обеспечивающие проведение испытаний с нагрузками от единиц до нескольких сотен миллиньютонов, получили очень широкое распространение. По своим характеристикам они могут быть отнесены к классу миллитрибометров. Их продвижению способствовало появление малогабаритных прецизионных узлов трения, материалы которых необходимо испытывать в миллиразмерном диапазоне нагрузок и скоростей. Для обеспечения возможности сертификации таких материалов в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси разработан миллитрибометр МТУ-2К7 [11].

Прибор предназначен для измерения сил (коэффициентов) трения материалов и покрытий в контакте со сферическим контртелом при их возвратно-поступательном относительном движении. Испытания могут проводиться как в условиях сухого трения, так и при трении в среде смазочного материала. Скорость скольжения выбирается из интервала 0,1–10 мм/с. Длина трассы трения регулируется от 1 до 10 мм. Диапазон устанавливаемых при испытаниях нормальных нагрузок составляет 10–1000 мН. Шарик-контртело может иметь диаметр от 1 до 5 мм. Контролируемые диапазоны изменений нагрузки и диаметра шарика обеспечивают давление, достаточное для испытаний практически всех классов материалов – от полимеров до металлов, в условиях от упругого до пластичного состояния в контакте. Это существенно расширяет область применения прибора, позволяя использовать его для экспрессной оценки триботехнических свойств материалов узлов трения общего назначения.

Конструктивно миллитрибометр состоит из двух основных блоков – силоизмерительного модуля 1 и привода возвратно-поступательного движения 2, расположенных на основании 3 (рис. 4, а).

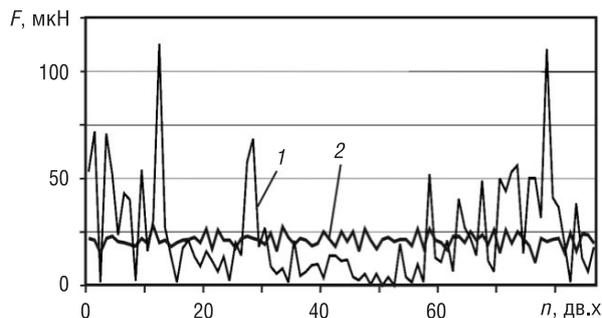


Рис. 3. Зависимость силы трения от пути трения при разных нагрузках: 1 – нагрузка 200 мкН, 2 – 500 мкН

Fig. 3. Dependences of friction force on friction path length when different loads: 1 – load of 200 мкН, 2 – 500 мкН

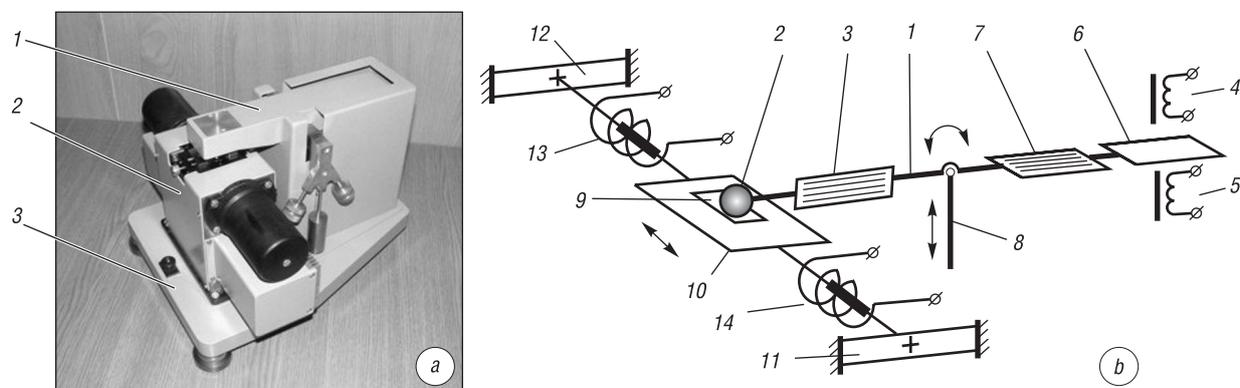


Рис. 4. Конструкция миллитрибометра МТУ-2К7: а – общий вид прибора, б – принципиальная схема (обозначения см. по тексту)

Fig. 4. Design of millitribo-meter MTU-2K7: а – general view, б – basic setup (the tags explained in text)

Силоизмерительный блок выполнен в виде коромысла 1 (рис. 4, *b*), на одном конце которого установлено сферическое контртело 2 и датчик сил трения 3. Усилие нормальной нагрузки обеспечивается электромагнитами 4 и 5, взаимодействующими с якорем 6, расположенным на противоположном от контртела конце консоли. Контроль нормальной нагрузки осуществляется датчиком 7. Обратная связь от датчика 7 заведена на вход схемы управления силой тока в катушках 4 и 5, что обеспечивает постоянство нагрузки в ходе испытаний, компенсируя ее возможные изменения из-за неплоскостности образца, погрешностей его установки или неравномерности износа.

Весь силоизмерительный блок базируется на штоке подъемного механизма 8, с помощью которого производится подвод индентора к образцу 9 и его отвод по окончании испытаний. Такое решение позволяет исследовать образцы с различной толщиной (до 20 мм) и облегчает их установку. Образец 9 фиксируется на столе 10, расположенном на упругом пантографе, который образован пружинными шарнирами 11 и 12 (показано схематически). Применение направляющих изгиба позволяет избежать появления таких негативных явлений, как скачкообразный характер перемещения при малых скоростях движения, а также шума и вибраций, присущих традиционно используемым направляющим скольжения и качения. Возвратно-поступательное движение стола обеспечивается электромагнитами 13 и 14.

Испытания проводятся в автоматическом режиме. Управление осуществляется с помощью специальной программы, позволяющей ввести требуемые по условиям эксперимента значения нагрузки, скорости скольжения, длины единичного хода и требуемого пути трения. В ходе эксперимента программа регистрирует данные, поступающие с микротрибометра, и формирует файл протокола эксперимента. Испытания прекращаются по достижении заданного пути трения или превышении некоторого заранее установленного предельного коэффициента трения (обычно единицы).

Разработанная методика аттестации позволяет проводить поверку прибора в лабораторных условиях с использованием стандартного набора гирь 0,01–100 г и электронных весов класса точности «Высокий–II» (ГОСТ 24104-01) с верхним пределом измерений не ниже 100 г и дискретностью 0,001 г.

Измерение субмикронного износа. Износ материалов при испытаниях на микротрибометрах обычно не превышает несколько микрон, а для металлов, керамики и металл-металлоидных покрытий он может быть настолько мал, что дорожка трения не обнаруживается визуально и не определяется профилометром. Использование атомно-силовой микроскопии также не всегда продуктивно, поскольку ширина следа трения (200–500 мкм) существенно превышает размер его поля измерений. Для определения субмикронных значений износа наибольшее распространение получил метод, основанный на использовании интерференционных микроскопов. Эти приборы позволяют не только проводить измерения высот неровностей с разрешением порядка 10 нм, но и получать оптическое изображение анализируемого участка поверхности. Однако самый распространенный в отечественных лабораториях прибор такого типа МИИ-4 не отвечает современным требованиям – в нем не поддерживается возможность регистрации цифровых изображений; процедура измерений, проводимая с помощью опто-механического микрометра, сложна и часто приводит к ошибкам. Тем не менее современные средства вычислительной техники и периферийных устройств позволяют модернизировать этот прибор, приспособив его к решению требуемых задач. В частности, один из вариантов такой системы был разработан в Институте механики металлополимерных систем им. В. А. Белого НАН Беларуси [12].

Система предназначена для измерения малых (от 0,01 до 1 мкм) линейных износов материалов и покрытий после триботехнических испытаний, регистрации изображений поверхностей трения и частиц износа, оценки высот неровностей и линейных размеров различных неоднородностей. Общий вид системы представлен на рис. 5, а ее основные технические характеристики приведены в табл. 2.

Все функции анализа изображений и интерференционных картин реализованы в виде программной системы, представленной на рис. 6. Интерфейс программы состоит из двух окон. Окно 1 предназначено для вывода изображений, формируемых оптической системой прибора и камерой, а панель 2 – для управления системой.

Окно 1 поддерживает два режима отображения информации: вывод видеопотока и регистрация кадра. В режиме регистрации текущее изображение видеопотока фиксируется, производится расчет масштабной шкалы 3 и разблокируются управляющие элементы 4–7, используемые для разметки интерференционной картины поверхности. Поддерживается функция измерения размеров наблюдаемых объектов, для чего указатели начала координат 8 и манипуляторы «мышь» 9 устанавливаются в соответствующих точках изображения. На рис. 6 они размещены по краям дорожки трения, ширина которой представлена в области 10 окна панели управления 2. Панель управления 2 служит для задания режимов формирования 11 и регистрации 12 изображений, анализа интерференционной картины 13 и вывода результатов измерений и информационных параметров – метрики наблюдаемого изображения отображаются в области 14, а результаты измерений высот выводятся в поле 15.

Измерения производятся относительно нерабочего участка поверхности либо искусственно созданных баз – царапин или отпечатков индентора. Результаты измерений выводятся в файл протокола в виде пар координат. Последовательное определение отклонений поверхности по выбранной интерферометрической полосе позволяет восстановить профиль поверхности с разрешением (расстоянием между отсчетами) порядка 2 мкм.

При анализе износа после триботехнических испытаний образцов по схеме сфера/плоскость возникает возможность оценки напряженно-деформированного состояния материалов в зоне трения. На рис. 7 представлена схема профиля дорожки трения, образованной сферическим индентором.

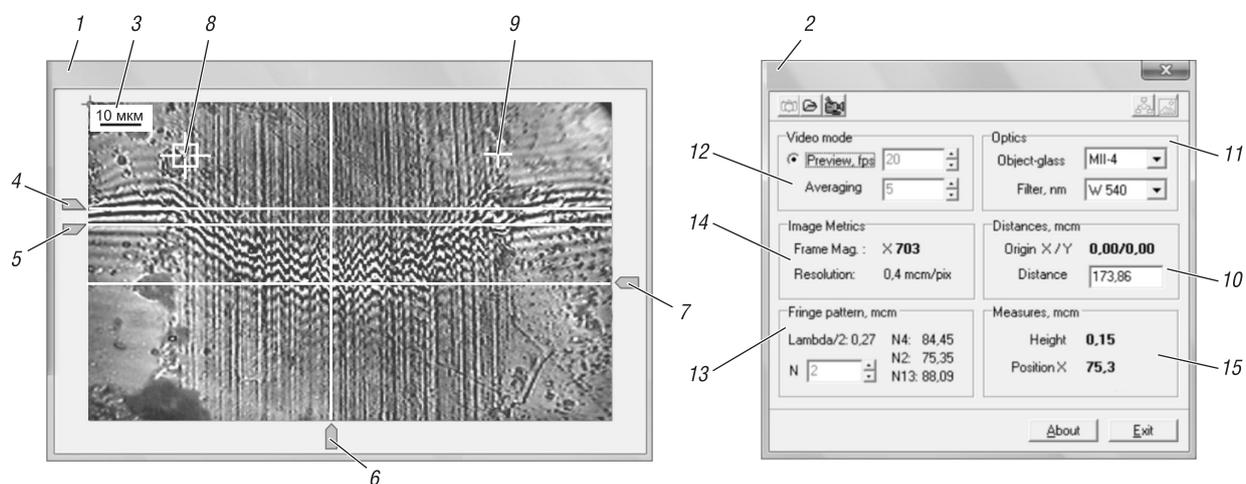


Рис. 6. Программный интерфейс оптического профилометра (обозначения см. по тексту)
 Fig. 6. Software interface of optical profilometer (the tags explained in text)

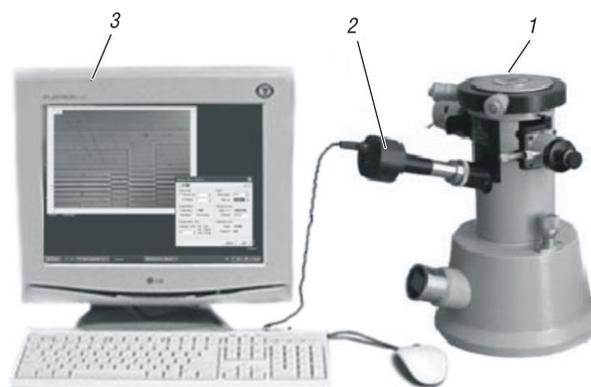


Рис. 5. Оптический профилометр: 1 – интерферометр, 2 – цифровая камера, 3 – блок управления и анализа результатов
 Fig. 5. Optical profilometer: 1 – interferometer, 2 – digital camera, 3 – block of control and results analysis

Таблица 2. Рабочие характеристики оптического профилометра ПОИ-08
 Table 2. Operating parameters of optical profilometer POI-08

Параметр	Значение
Диапазон измерений, мкм	0,01–1,0
Горизонтальное разрешение, мкм	2
Поле зрения, мкм	320×320
Оптическое увеличение, крат	120
Размер кадра (Ш×В), пиксел	1280×720
Формат пиксела	BGR

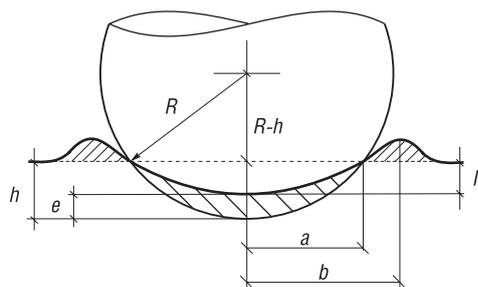


Рис. 7. Схема анализа дорожки износа плоской поверхности сферическим индентором (обозначения см. по тексту)

Fig. 7. Wear analysis scheme of friction path of spherical indenter on plate (the tags explained in text)

Глубина h дорожки шириной $2a$, образованная индентором с радиусом R и рассчитываемая по формуле $h = R - (R^2 - a^2)^{1/2}$, не всегда соответствует износу I , который формируется не только удалением материала, но и за счет увеличения площади контакта тел при упругой деформации. Тогда величина $e = h - I$ определяет упругое восстановление изношенного материала после снятия нагрузки, а соотношение $\psi = b/a$ характеризует долю пластического деформирования материала в процессе износа [5]. При $\psi = 1$ гребни по краям дорожки отсутствуют и материал изнашивается в результате своего разрушения в зоне трения. Чем выше значение ψ , тем больше материала выдавливается по сторонам.

Компонента коэффициента трения, обусловленная пластическим оттеснением, может быть оценена как $f_{\text{п}} \approx 4a/3\pi R$ [6], а связанная с упругими деформациями – как $f_y \approx f_{\text{п}}/\psi$. Таким образом, достаточно простой анализ геометрических параметров дорожки трения позволяет получить информацию об упругопластическом поведении изнашиваемого материала в зоне трения.

Оценка механизмов изнашивания по частицам износа. Проблема изучения трения и изнашивания заключается еще и в том, что процессы в зоне контакта двух тел недоступны непосредственному наблюдению. Морфология поверхностей трения и частиц износа в данном случае является единственным источником информации о механизмах контактного взаимодействия.

В настоящее время широкое распространение получили предложенные И. В. Крагельским феноменологические модели изнашивания [13]. С их помощью установление действующих механизмов изнашивания производится по результатам классификации морфологии поверхностей трения и наследующих особенности их строения частиц износа (рис. 8).

Так, отделение тонких слоев материала и формирование областей отслаивания и выкрашивания связывается с усталостным изнашиванием, которое протекает в условиях циклического упругого контакта. Вальцевание, оттеснение и пропахивание поверхности, сопровождающиеся

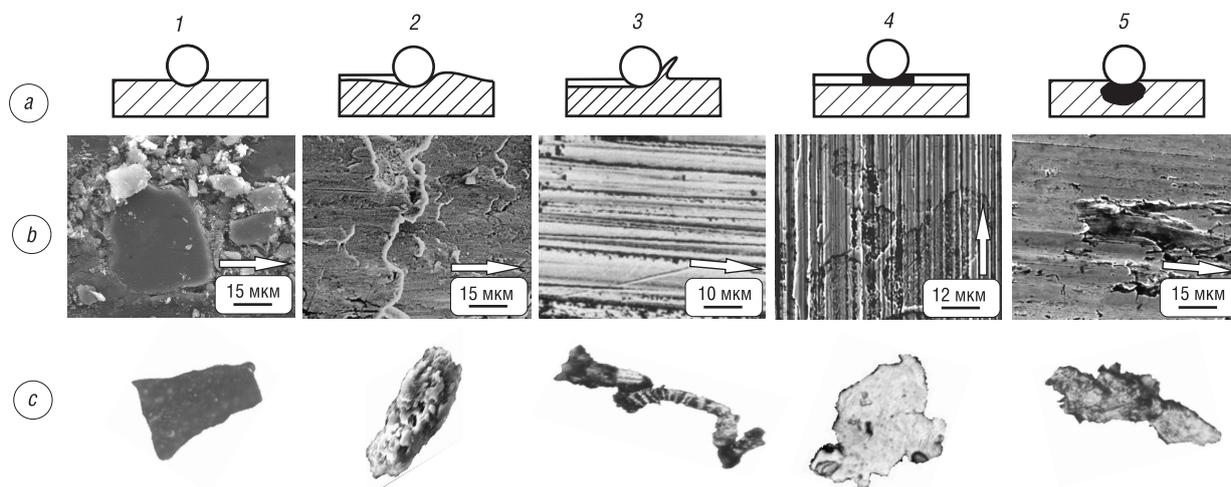


Рис. 8. Разрушение поверхностей при трении: *a* – виды разрушения фрикционных связей по И. В. Крагельскому: 1 – упругий контакт, 2 – пластический контакт, 3 – микрорезание, 4 – адгезионное разрушение пленки, 5 – когезионное разрушение материала; *b* – поверхности трения, соответствующие схемам *a* (стрелками обозначено направление движения контртела); *c* – частицы износа, соответствующие видам разрушения поверхностей трения, представленным на изображениях *b*: 1 – усталостный тип, 2 – блочный, 3 – стружковая частица, 4 – ламинарная, 5 – жесткого скольжения (схватывания)

Fig. 8. Surface damage under friction: *a* – kinds of friction-bond damage per I. V. Kragelskii: 1 – elastic contact, 2 – plastic contact, 3 – microcutting, 4 – adhesive damage of the film, 5 – cohesive damage of material; *b* – friction surfaces corresponding to schemes *a* (the arrows indicate the direction of counterbody movement); *c* – wear particles corresponding to types of friction-surface damage shown in images *b*: 1 – fatigue type, 2 – block type, 3 – chop, 4 – laminar, 5 – rigid sliding (seizure)

отделением краев образующихся гребней и сворачиванием ролов, свидетельствует о пластическом деформировании поверхностного слоя при превышении допустимой нагрузки и разрыве смазочной пленки, появление частиц износа в виде стружки, возникновение линейчатого рельефа из неровностей с острыми гранями – о микрорезании и абразивном изнашивании. Дефекты в виде глубинных вырывов, отслоения тонких пленок, присутствие в смазочном материале ламинарных частиц изнашивания, усталостно-блочных частиц и частиц жесткого скольжения указывают на адгезионное и когезионное взаимодействие контактирующих поверхностей. Таким образом, анализ частиц износа и поверхностей трения позволяет оценить режимы эксплуатации трибосопрежения, состояние смазочного материала, выявить нежелательные процессы в функционировании трибосистем и своевременно принять меры по их устранению [14].

Первоначально методы диагностики текущего состояния узлов трения по морфологии частиц износа были основаны на экспертном визуальном контроле. В настоящее время успехи в развитии вычислительной техники, методов обработки и анализа изображений позволили автоматизировать решение этой задачи, и морфологический анализ поверхностей трения и частиц износа получил широкое распространение в решении практических проблем трибологии.

Ключевым моментом в реализации рассматриваемых методов является введение понятия морфологии поверхностей трения и частиц износа, которая определяется как совокупность характеристик их текстуры, формы и цвета. Существуют различные подходы к описанию этих понятий: сравнительный, параметрический и использования инвариантных представлений. Однако наиболее перспективным, по нашему мнению, является подход, основанный на параметризации визуального содержания морфологических признаков [15].

В основе этого подхода лежит предположение о том, что представительное описание морфологии возможно лишь с помощью оценок, отражающих визуальное содержание анализируемых объектов. Его реализация основана на введении структурного элемента – минимальной визуально воспринимаемой области анализируемого объекта. Считается, что особенности расположения структурных элементов друг относительно друга на малых расстояниях определяют локальные морфологические свойства объектов, а на больших – глобальные свойства. Существуют различные подходы к реализации данного подхода, один из которых основан на использовании гистограмм совместной встречаемости (ГСВ).

Для описания текстуры с помощью ГСВ в качестве структурного элемента выбирается участок поверхности T_i (рис. 9), положение которого характеризуется азимутальным направлением градиента G_i и расстоянием P_i от центра координат (рис. 9, а). Взаимное положение двух текстурных элементов (T_1, T_2) задается расстоянием между ними ρ и разницей направлений их градиентов g . Для получения инвариантного описания поверхности рис. 9, б, основанного на ГСВ (рис. 9, с), подсчитывается число пар текстурных элементов с определенными

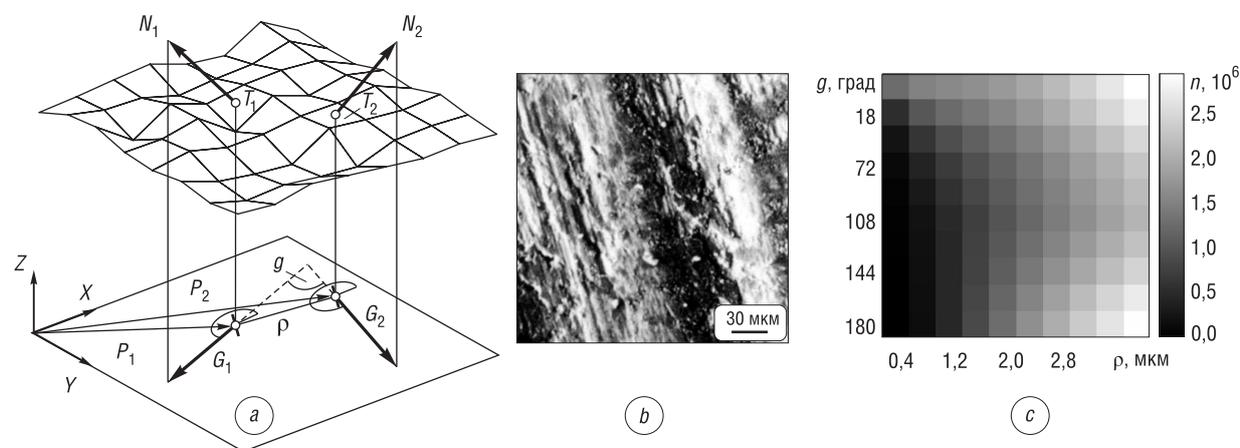


Рис. 9. Параметризация визуального содержания текстуры и формы: а – схема определения структурных элементов текстуры, б – объект анализа (поверхность трения), с – ее ГСВ (обозначения см. по тексту)

Fig. 9. Parameterization of visual content of texture and shape: а – schemes for determination of structural elements of texture; б – object of analysis (friction surface); с – its matrix of co-occurrence (MCO) (the tags explained in text)

значениями ρ и g , присутствующими на анализируемом участке поверхности. Для этого допустимо использовать как высотно-кодированные, так и полутоновые изображения (рис. 9, *b*), полученные различными методами микроскопии по схеме верхнего освещения. Аналогичным образом можно описать и характеристики цвета и формы.

При соответствующем нормировании ГСВ не зависят от масштаба и положения объекта в поле зрения. Каждый из элементов ГСВ можно рассматривать в качестве признака. Однако поскольку элементы ГСВ определяют участки поверхности или контура, то появляется возможность сравнения объектов с визуализацией их сходства или различия. Суть этой методики заключается в отметке на изображениях сравниваемых объектов участков, элементы ГСВ которых имеют близкие или существенно разные значения. В первом случае это позволяет визуализировать сходство, а во втором – различие объектов. На рис. 10 представлены результаты выполнения этих задач.

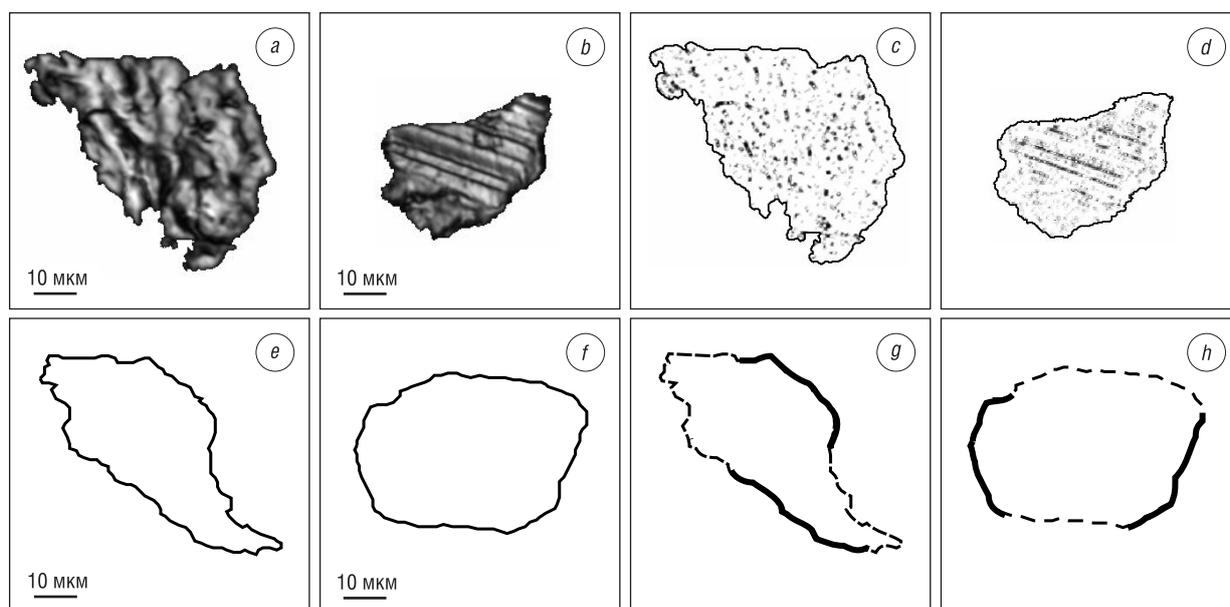


Рис. 10. Результаты автоматического сравнения сходства/различия морфологии частиц: *a, b, e, f* – изображения и контуры сравниваемых частиц; *c, d* – отличия текстур частиц *a* и *b* (выделены уникальные, не встречающиеся на другой частице элементы текстур); *g, h* – сходство контуров частиц *e* и *f* (выделены сегменты контуров, имеющие наибольшее сходство)

Fig. 10. Results of automatic definition of similarity/dissimilarity of particle morphology: *a, b, e, f* – images and contours of compared particles; *c* and *d* – distinctions in the textures of particles *a* and *b* (unique unmet in other particles texture elements are isolated); *g* and *h* – contour similarity of particles *e* and *f* (the segments of the contours most similar are isolated)

Значения ГСВ можно рассматривать как координаты некоторой точки в многомерном пространстве. Положение точек в этом пространстве отражает сходство отображаемых ими объектов – чем ближе расположены точки, тем меньше различие их координат-признаков и тем больше соответствующие объекты «похожи» друг на друга и наоборот. Близкие по своим морфологическим признакам классы объектов группируются в кластеры, и задача классификации сводится к определению положения объектов относительно границ кластеров.

При числе признаков менее трех положение точек в пространстве может быть отображено графически, и выявление границ классов в этом случае не представляет сложностей. Для большего числа признаков используют методы, позволяющие осуществить проецирование точек из исходного многомерного пространства на плоскость. Проецируя морфологические признаки частиц износа и поверхностей трения, можно построить карту состояний трибосистемы, которая позволяет судить о ее текущем состоянии и действующих механизмах изнашивания. Рассмотрение такой карты (рис. 11), полученной проецированием 14-мерного пространства морфологических признаков различных участков поверхности трения, показало, что диагностируе-

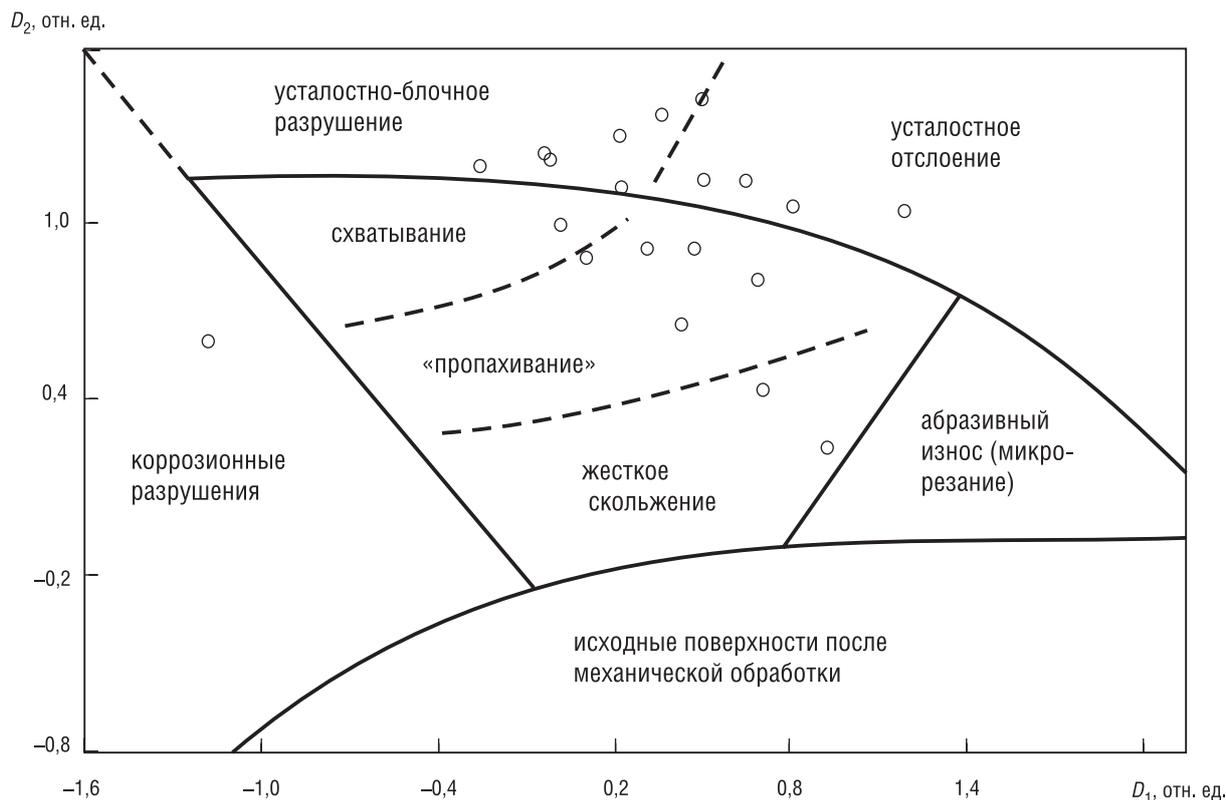


Рис. 11. Карта морфологических классов поверхностей трения и частиц износа, соответствующих различным механизмам эксплуатационной деградации узлов трения. D_1 и D_2 – функциональные размерности плоскости проецирования

Fig. 11. Map of morphological classes of friction surfaces and wear particles corresponded to different mechanisms of friction units operating degradation. D_1 and D_2 – functional dimensions of projecting plate

мая трибосистема работает в жестких режимах. Последующий анализ позволил выявить причину этого, связанную с деградацией смазочного материала.

Оценка эквивалентности результатов триботехнических испытаний. Одной из важных проблем трибологии является масштабирование и оценка параметрической эквивалентности результатов триботехнических испытаний. Прежде всего это касается возможности переноса данных, полученных на образцах одного масштаба, на другой – больший или меньший, и сравнения результатов лабораторных и натурных исследований. В частности, последняя задача возникла при подготовке космического эксперимента «Трибокосмос» [16], в ходе которого планируется осуществить триботехнические испытания различных материалов в условиях открытого космоса на борту Международной космической станции.

Для проведения эксперимента в НАН Беларуси при участии академических учреждений – Института механики металлополимерных систем им. В. А. Белого, Объединенного института машиностроения, Физико-технического института, а также НПО «Планар» был изготовлен бортовой трибометр (рис. 12, а) – устройство, позволяющее проводить испытания материалов на трение и износ в условиях действия факторов космического пространства (ФКП).

В ходе эксперимента предполагается провести ряд наземных испытаний тех же материалов. Наземные испытания будут проводиться по двум схемам. Первая схема основана на максимальном приближении к условиям работы бортового трибометра – это так называемые имитационные испытания в криовакуумной камере на идентичном бортовому приборе (рис. 12, б), вторая предполагает проведение исследований в стандартных физических условиях.

Целью проведения наземных исследований является:

расширение параметрической базы эксперимента, то есть дополнение результатов космического эксперимента данными, полученными в ходе наземных испытаний;

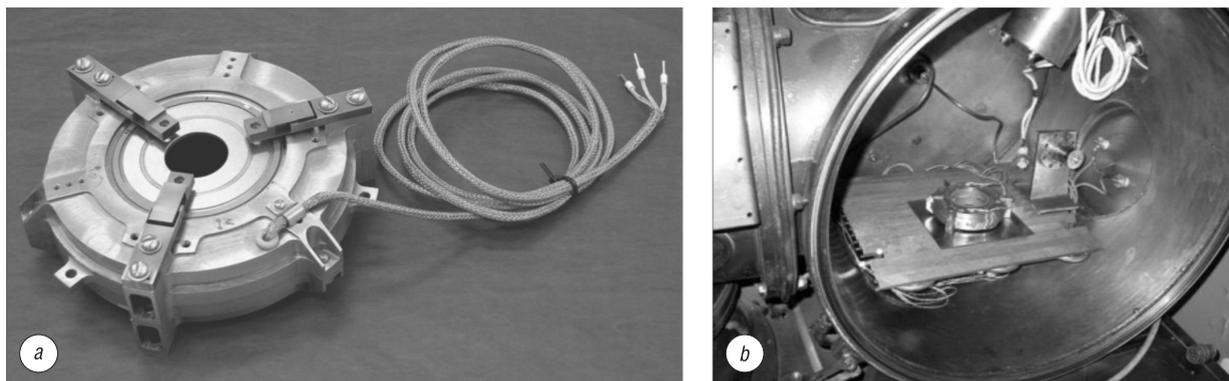


Рис. 12. Оборудование для проведения испытаний материалов на трение и износ в открытом космическом пространстве и наземных условиях: *a* – бортовой трибометр, *b* – трибометр в камере имитационных криовакуумных испытаний

Fig. 12. Devices for materials test on friction and wear in open space and ground-based conditions: *a* – on-board tribometer, *b* – tribometer in the imitation cryogenic vacuum chamber

оценка влияния факторов космического пространства на триботехнические характеристики антифрикционных и износостойких материалов.

В соответствии с данной схемой наземный эксперимент проводится по расширенной программе, которая предусматривает реализацию полнофакторного эксперимента (при всех возможных нагрузочно-скоростных режимах), регистрацию целого ряда дополнительных параметров (измерение раздельного износа диска и инденторов, трибоакустической эмиссии, работы выхода электронов и др.) и проведение постэкспериментальных исследований образцов, включающих изучение морфологии частиц износа и следов трения, микрорентгеноспектрального и рентгеноструктурного анализа и другие современные методы изучения поверхностных слоев твердых тел.

При идентичности условий проведения наземных и бортовых испытаний данная схема исследований позволяет расширить параметрическую базу космического эксперимента. Однако обеспечение такой идентичности подразумевает моделирование ФКП, контроль которых в полном объеме в ходе бортовых испытаний по техническим причинам невозможен. Таким образом, возникает задача обеспечения параметрической эквивалентности наземного эксперимента в условиях неполной информации об условиях проведения бортовых испытаний. Для ее решения использован подход, аналогичный анализу параметров морфологии поверхностей трения в многомерном пространстве признаков.

Каждый параметр трибосистемы может быть представлен как координата некоторой точки в многомерном пространстве признаков. Изменения этих параметров в ходе эксперимента образуют гиперлинию, каждая точка которой соответствует определенному состоянию испытуемой трибосистемы. В данное пространство допустимо отобразить несколько трибосистем, причем с разными наборами контролируемых параметров. Для упрощения задачи многомерное пространство состояний трибосистем можно отобразить в двумерное. Если линии анализируемых экспериментов совпадают, то их приемлемо считать эквивалентными. В [17] показано, что если гиперлинии в какой-либо точке не совпадают, то можно установить причину такого несовпадения, решая соответствующую систему уравнений. Таким образом, возникает возможность установления влияния неконтролируемых параметров или расхождения известных.

Продемонстрируем этот метод задачей определения параметрической эквивалентности нормированных параметров модельных наземного и бортового экспериментов. Представленные зависимости несколько отличаются на участке приработки пары трения (рис. 13, *a*). Необходимо выявить возможные причины наблюдаемого расхождения.

При бортовом эксперименте не известна температура внутри трибометра; кроме того, температура в приконтактной зоне в начале бортового эксперимента несколько выше, чем наземного (табл. 3). Исходя из этого проверялось предположение о влиянии начальной температуры T_c бортового трибометра на результаты эксперимента.

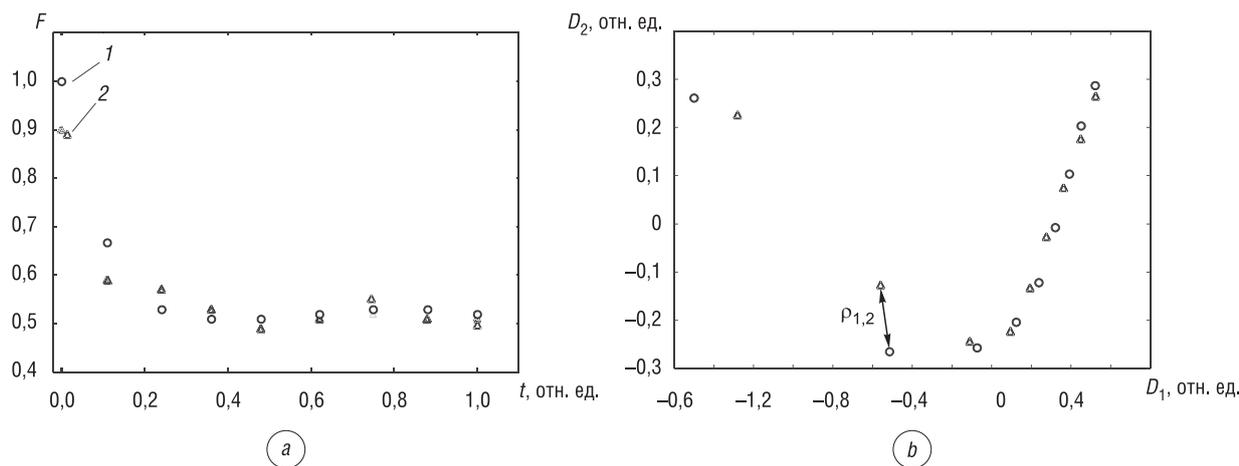


Рис. 13. Результаты эксперимента на трение: *a* – зависимость силы трения F от времени t (нормированное значение), регистрируемой при бортовых (1) и наземных (2) испытаниях; *b* – результат отображения состояния бортовой трибосистемы в редуцированное признаковое пространство D_1 - D_2 наземных испытаний

Fig. 13. Results of friction test: *a* – friction force F on time t dependencies (normalized values), registered in on-board (1) and ground-based (2) tests; *b* – result on-board tribosystem condition mapping to reduced D_1 - D_2 feature space of ground-based test

На рис. 13, *b* показано совместное редуцированное параметрическое пространство состояний наземной и бортовой трибосистем. Видно значительное расхождение между состояниями систем в начале эксперимента. Далее, выбрав точки, расположенные на расстоянии $\rho_{1,2}$, решаем следующее уравнение относительно температуры бортовых испытаний:

$$\left((D_1^{(1)} - D_1^{(2)})^2 + (D_2^{(1)} - D_2^{(2)})^2 \right)^{1/2} = \rho_{1,2}$$

где D – уравнения координат редуцированного пространства состояний наземной системы в точке, соответствующей расстоянию $\rho_{1,2}$ (рис. 13, *b*).

Полученное значение $T_c = 1,04T_e$ свидетельствует, что температура окружающей среды при бортовых испытаниях T_c была несколько выше, чем температура при наземных T_e . Такой результат можно интерпретировать как возможный действующий фактор. Для проверки этого необходимо скорректировать условия наземных испытаний (повысить температуру в имитационной камере) и провести эксперимент еще раз.

Т а б л и ц а 3. Модельные параметры бортового и наземного испытаний на трение, отн. ед.
T a b l e 3. Modeled parameters of on-board and ground-based friction test, rel. units

Время	Бортовой эксперимент			Наземный эксперимент			
	Сила трения	Линейный износ	Температура образца	Сила трения	Линейный износ	Температура образца	Температура внутри трибометра
0,00	1,00	0,00	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00
0,11	0,68	0,57	0,43	0,59	0,51	0,38	0,87
0,24	0,53	0,85	0,77	0,57	0,75	0,77	0,95
0,36	0,51	0,925	0,92	0,53	0,81	0,94	0,99
0,48	0,51	0,935	0,95	0,49	0,89	0,96	0,99
0,62	0,52	0,94	0,98	0,51	0,92	0,99	0,98
0,75	0,53	0,96	0,98	0,52	0,93	1,00	0,97
0,88	0,53	0,97	1,00	0,51	0,94	1,00	0,98
1,00	0,52	1,00	0,99	0,51	0,95	1,00	0,99

Заключение. Контактные явления, протекающие при взаимодействии твердых тел, обусловлены реализацией многочисленных физико-механических процессов. Многообразие их проявлений и взаимозависимость требуют комплексного подхода к решению исследовательских задач в этой области. С одной стороны, современные тенденции в области приборостроения и точной механики направлены на уменьшение размеров исполнительных механизмов и их узлов. С другой – все более широкое распространение получают изделия, функционирующие в экстремальных условиях. Расширение диапазонов нагрузок, скоростей и условий работы технических объектов требует не только применения новых материалов и оригинальных конструкций, но и пересмотра значимости механизмов контактного взаимодействия, оказывающих влияние на эксплуатационные характеристики конечных изделий и их узлов. Это в свою очередь диктует необходимость разработки и использования новых приборов и методов исследований.

Список использованных источников

1. Handbook of Micro/Nano Tribology / ed. by B. Bhushan. – New York: CRC Press, 2000. – 628 p.
2. Дроздов, Ю. Н. Трение и износ в экстремальных условиях / Ю. Н. Дроздов, В. Г. Павлов, В. Н. Пучков. – М.: Машиностроение, 1986. – 224 с.
3. Myshkin, N. K. Importance of Scale Factor in Tribology / N. K. Myshkin, A. Ya. Grigoriev // *BaltTrib' 2013: VII International Scientific Conference, Kaunas, 14–15 November 2013: Proceedings*. – Kaunas: Aleksandras Stulginskis University, 2013. – P. 165–168.
4. Stachowiak, G. W. Characterization and classification of wear particles and surfaces / G. W. Stachowiak, P. Podsiadlo // *Wear*. – 2001. – Vol. 249, № 3–4. – P. 194–200.
5. Overbeek, J. T. Surface force measurement / J. T. Overbeek, M. J. Sparnaay // *Proc. of Nederlandse Akademie van Wetenschappen*. – 1951. – Vol. 54. – P. 387–396.
6. Абрикосова, И. И. Прямое измерение молекулярного притяжения в функции расстояния между поверхностями / И. И. Абрикосова, Б. В. Дерягин // *Журн. эксперимент. и теорет. физики*. – 1951. – Т. 21, № 8. – С. 945–950.
7. Israelachvili, J. N. Intermolecular and Surface Forces / J. N. Israelachvili. – New York: Acad. Press., 1991. – 348 p.
8. Измерение аттракционного взаимодействия технических поверхностей / А. Я. Григорьев [и др.] // *Трение и износ*. – 2003. – Т. 24, № 4. С. 405–412.
9. Григорьев, А. Я. Трение мономолекулярных самособирающихся покрытий щеточного типа / А. Я. Григорьев, И. Н. Ковалева, Н. К. Мышкин // *Трение и износ*. – 2008. – Т. 29, № 6. – С. 596–603.
10. Комков, О. Ю. Влияние жидкостного мениска на величину поверхностных сил / О. Ю. Комков // *Трение и износ*. – 2007. – Т. 28, № 1. – С. 21–32.
11. Возвратно-поступательный миллитрибометр МТУ-2К7 / А. Я. Григорьев [и др.] // *Трение и износ*. – 2014. – Т. 35, № 6. – С. 664–669.
12. Григорьев, А. Я. Система измерения субмикронных значений линейного износа материалов на базе микроинтерферометра МИИ-4 / А. Я. Григорьев // *Материалы, технологии, инструменты*. – 2015. – Т. 20, № 1. – С. 90–93.
13. Крагельский, И. В. Основы расчетов на трение и износ / И. В. Крагельский, М. Н. Добычин, В. С. Комбалов. – М.: Машиностроение, 1977. – 426 с.
14. Roylance, V. J. Ferrography – then and now / V. J. Roylance // *Tribology International*. – 2005. – Vol. 38. – P. 857–862.
15. Мышкин, Н. К. Морфология: текстура, форма и цвет поверхностей трения и частиц износа в задачах трибодиагностики / Н. К. Мышкин, А. Я. Григорьев // *Трение и износ*. – 2008. – Т. 29, № 3. – С. 252–259.
16. Эксперимент «Трибокосмос» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.energia.ru/rus/iss/poisk/poisk_09.html – Дата доступа: 18.10.2017.
17. Equipments and materials for tribotesting in open space on International Space Lab / N. K. Myshkin [et al.] // *Tribology in Industry*. – 2011. – Vol. 33, № 1. – P. 43–47.

References

1. Bhushan B. (ed.) *Handbook of Micro/Nano Tribology*. New York, CRC Press, 2000. 628 p. DOI: 10.1201/9781420050493
2. Drozdov Ju. N., Pavlov V. G., Puchkov V. N. *Friction and wear under extreme conditions*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 224 p. (in Russian).
3. Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya. Importance of scale factor in tribology. *BaltTrib' 2013: VII International Scientific Conference, Kaunas, 14–15 November 2013: Proceedings*. Kaunas, Aleksandras Stulginskis University, 2013, pp. 165–168.
4. Stachowiak G. W., Podsiadlo P. Characterization and classification of wear particles and surfaces. *Wear*, 2001, vol. 249, no. 3–4, pp. 194–200. DOI: 10.1016/s0043-1648(01)00562-2
5. Overbeek J. T., Sparnaay M. J. Surface force measurement. *Proceedings of Nederlandse Akademie van Wetenschappen*, 1951, vol. 54, pp. 387–396.
6. Abrikosova I. I., Derjagin B. V. Direct measurements of molecular attraction as a function of distance between surfaces. *Zhurnal eksperimental'noi i tekhnicheskoi fiziki = Journal of Experimental and Technical Physics*, 1951. vol. 21, no. 8, pp. 945–950 (in Russian).

7. Israelachvili J. N. *Intermolecular and surface forces*. New York, Acad. Press., 1991. 348 p.
8. Grigoriev A. Ya., Dubravina A. M., Kovalev A. V., Kavaliouva I. N., Komkov O. Yu., Myshkin N. K. Measurement of contact adhesion and attraction between the engineering surfaces. *Journal of Friction and Wear*, 2003, vol. 24, no. 4, pp. 51–58.
9. Grigoriev A. Ya., Kovaleva I. N., Myshkin N. K. Friction of brushlike self-assembled monomolecular coatings. *Journal of Friction and Wear*, 2008, vol. 29, no. 6, p. 434–440. DOI: 10.3103/s1068366608060044
10. Komkov O. Yu. Influence of liquid meniscus on surface forces. *Journal of Friction and Wear*, 2007, vol. 28, no. 1, pp. 19–31. DOI: 10.3103/s1068366607010035
11. Grigoriev A. Ya., Gutsev D. M., Zozulya A. P., Kovaliova I. N., Kudritskii V. G., Myshkin N. K., Semenyuk M. S. Reciprocating MTU-2K7 Millitribometer. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no. 6, pp. 455–459. DOI: 10.3103/s1068366614060063
12. Grigoriev A. Ya. System for measurement of submicron values of linear wear of material based on micro-interferometer MII-4. *Materialy, tehnologii, instrumenty = Journal of Materials, Technology and Tools*, 2015, vol. 20, no. 1, pp. 90–93 (in Russian).
13. Kragel'skii I. V., Dobychin M. N., Komalov V. S. *Fundamentals of friction and wear*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 426 p. (in Russian).
14. Roylance B. J. Ferrography – then and now. *Tribology International*, 2005, vol. 38, pp. 857–862. DOI: 10.1016/j.triboint.2005.03.006
15. Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya. Morphology: texture, shape, and color of friction surfaces and wear debris in tribo-diagnostics problems. *Journal of Friction and Wear*, 2008, vol. 29, no. 3, pp. 192–199. DOI: 10.3103/s1068366608030070
16. *Experiment «Tribocosmos»*. Available at: https://www.energia.ru/rus/iss/poisk/poisk_09.html (Accessed 18 October 2017).
17. Myshkin N. K., Grigoriev A. Ya., Basiniuk V. L., Mardasevich A. I., Kudritsky V. G., Kavaliouva I. N. Equipments and materials for tribotesting in open space on International Space Lab. *Tribology in Industry*, 2011, vol. 33, no. 1, pp. 43–47.

Информация об авторе

Григорьев Андрей Яковлевич – доктор технических наук, профессор, директор Института механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ул. Кирова, 32А, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: aygri@tut.by

Information about the author

Andrei Ya. Grigoriev – D. Sc. (Engineering), Professor, Director of V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Science of Belarus (32A, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: aygri@tut.by

В. Л. Басинюк*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ДИНАМИКА ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ПРИВОДАХ С ГИБКОЙ СВЯЗЬЮ
ПРИ РАЗДЕЛЕНИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПЛАСТИН НА КРИСТАЛЛЫ
АЛМАЗНЫМ КРУГОМ**

Аннотация. Показаны возможности увеличения скорости резания при одновременном повышении точности координатных перемещений и снижения динамических нагрузок в начальный, наиболее опасный с позиции возникновения сколов и поломок, момент взаимодействия алмазного круга толщиной 15–120 мкм с полупроводниковой пластиной толщиной 250–500 мкм и диаметром 50–250 мм при ее разделении на кристаллы. При резании стол с полупроводниковой пластиной совершает возвратно-поступательные координатные циклические перемещения. В процессе его разгона до рабочей скорости подачи возникают механические колебания в направлении движения, имеющие частоту собственных колебаний. Эти колебания могут приводить к отклонению стола от заданной координаты и возникновению существенно отличных от прогнозируемых величин ускорений при достижении рабочей скорости подачи и последующем контакте пластины с алмазным кругом. Это может быть учтено при реализации технологического цикла, и в ряде случаев колебаниями можно программно управлять путем выбора рационального соотношения величин рабочего хода, длины холостого хода и частоты собственных колебаний, что позволяет уменьшить или исключить сколы и поломки полупроводниковой пластины и алмазного круга, уменьшить их толщины и повысить в 1,5–2 раза скорость обработки. Показаны возможности создания комбинированной системы приводов, использование которой позволяет исключить возникновение механических колебаний.

Ключевые слова: динамика, колебания, комбинированная система приводов, кристаллы, полупроводниковая пластина, точное электронное машиностроение

Для цитирования. Басинюк, В. Л. Динамика переходных процессов в приводах с гибкой связью при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы алмазным кругом / В. Л. Басинюк // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 68–75.

U. L. Basiniuk*Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus***DYNAMICS OF TRANSITION PROCESSES IN DRIVE MECHANISM WITH FLEXIBLE COMMUNICATION
AT WAFER SEPARATION BY A DIAMOND WHEEL**

Abstract. Possibilities of increase of cutting speed at simultaneous increase of accuracy of coordinate movements and decrease of dynamical loads at initial, the most dangerous from emergence of chips and breakages, moment of interaction of 15–120 microns thick diamond wheel with a wafer having 250–500 microns thickness and diameter of 50–250 mm, at its chipping are shown. The table with a wafer makes reciprocal coordinate cyclic movements at cutting. In the course of its acceleration to working feed rate there are mechanical oscillations in the direction of driving, which have natural frequency. These oscillations can lead to a table deviation from the machine coordinate and to occurrence of accelerations, significantly differ with predicted ones, at achievement of working feed rate and subsequent contact of a wafer with a diamond wheel. That can be considered at realization of a production cycle, and, in some cases, oscillations can be operated programmatically by the choice of rational ratios of values of working stroke, length of non-working stroke and free frequency that allows reducing or exclusion of chips and breakages of wafers and diamond wheel, reducing their thickness and increasing processing speed by 1,5–2 times. Possibilities of creation of combined system of drives which use allows exclusion emergence of mechanical oscillations are shown.

Keywords: dynamics, oscillations, the combined system of drives, chips, a semiconductor wafer, precise electronic engineering

For citation. Basiniuk U. L. Dynamics of transition processes in drive mechanism with flexible communication at wafer separation by a diamond wheel. *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. 1, pp. 68–75 (in Russian).

Ведение. Рассматривая перспективы развития микроэлектроники американская ассоциация Semiconductor Industry Association (SIA) и консорциум Semiconductor Research Corporation (SRC) отметили, что объем продукции в этой области производства каждое десятилетие возрастает в 2–2,5 раза. При этом размеры лежащих в основе этой продукции микрочипов (кристаллов) будут постоянно уменьшаться. Произойдет постепенный переход топологической нормы изготовления твердотельных интегральных схем от 28–65 к 10–22 нм [1].

В процессе изготовления микрочипов разделение полупроводниковых пластин на кристаллы осуществляется в основном резанием алмазным кругом толщиной 15–120 мкм. Толщина пластин составляет 250–500 мкм и менее при их диаметре 50–450 мм. Технологическое оборудование для разделения полупроводниковых пластин алмазным кругом имеет программно-управляемый привод с зубчато-ременной передачей, обеспечивающей кинематическую и силовую связь электромотор-редуктора с подвижным столом, на котором размещена разрезаемая полупроводниковая круглая пластина. Инкрементальный датчик для контроля перемещений стола в направлении его рабочего перемещения установлен на валу двигателя. Точность координатных перемещений в квазистатическом режиме движения составляет 10–20 мкм.

При перемещении стола в заданную координату в процессе его дальнейшего разгона до рабочей скорости подачи из-за наличия упругой связи между ним и мотор-редуктором возникают механические колебания с собственной частотой в направлении движения стола. Амплитуда этих колебаний при минимизации длины разгона и использовании скоростных подач в момент достижения рабочей скорости подачи может быть значительной, вследствие чего координата положения стола и его ускорение в ряде случаев существенно отличаются от прогнозируемых. Это приводит к повышенным динамическим нагрузкам при взаимодействии алмазного круга с полупроводниковой пластиной и, как следствие, возникновению на ней и алмазном круге сколов или их разрушению. Снижается производительность и выход годных кристаллов, возникает необходимость использования относительно невысоких скоростей обработки [1].

Следует отметить, что разделение полупроводниковых пластин на кристаллы является по существу финишной операцией, на которой стоимость пластин может достигать 30 тыс. долл. США. Таким образом, установление закономерностей, связывающих координатные перемещения стола и его ускорения при разгоне до рабочей скорости подачи, а также разработка технических решений, позволяющих исключить механические колебания при переходных процессах, имеет не только научное, но и практическое значение.

Целью исследований являлось установление закономерностей, связывающих координатные перемещения стола и его ускорения при разгоне до рабочей скорости подачи, разработка рекомендаций по обеспечению соответствия действительных и прогнозируемых координат, снижению ускорений и, как следствие, динамической нагруженности алмазного круга и полупроводниковой пластины в начальный момент их взаимодействия, а также предложений по созданию приводной системы, позволяющей на порядок и более снизить или исключить механические колебания стола при переходных процессах.

Методика и объект исследований. В качестве базовой принята схема программно-управляемого привода (рис. 1, *a*) серийно изготавливаемой прецизионной установки М-2085В ОАО «Планар» (рис. 1, *b*), в которой разгон стола до рабочей скорости подачи осуществляется с постоянным ускорением.

При разработке модели движения стола в процессе его разгона с используемым в установке М-2085 постоянным ускорением a до рабочей скорости подачи были приняты следующие допущения [1, 2]:

трением в сопряжениях шкива с зубчатым ремнем и в подшипниковых узлах шкива можно пренебречь;

коэффициенты вязкоупругого трения в механической системе и безразмерные коэффициенты затухания колебаний постоянны;

усилия сопротивления движению стола постоянны.

Процесс разгона стола до рабочей скорости подачи может быть разделен на два периода.

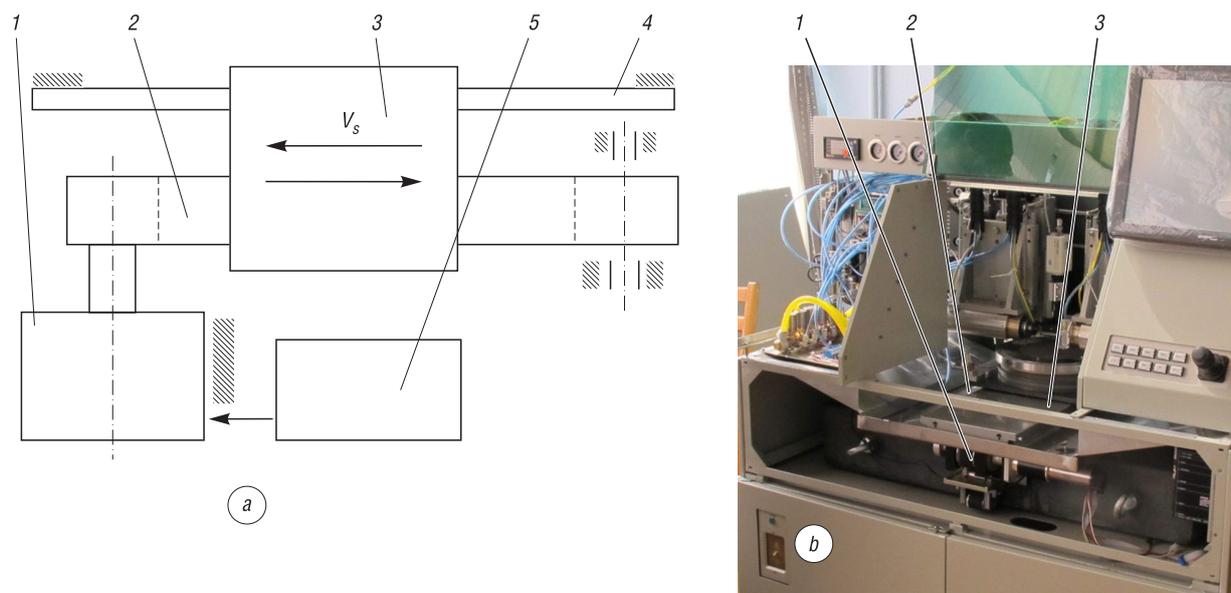


Рис. 1. Условная схема привода (а) и общий вид установки для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы М-2085 ОАО «Планар» (b): 1 – мотор-редуктор, 2 – зубчато-ременная передача, 3 – стол, 4 – линейная направляющая, 5 – модуль программного управления приводом

Fig. 1. The conditional scheme of the drive (a) and general form of device M-2085 of Planar Corporation for wafer separation: 1 – motor reducer, 2 – toothed belt drive, 3 – table, 4 – linear sliding bearing, 5 – module of program control of the drive

В первом периоде двигатель начинает вращение в момент времени t_0 , стол массой m еще неподвижен и происходит плавная упругая деформация зубчатого ремня, имеющего жесткость C_p , до величины в момент времени $t = 0$, при которой натяжение ремня и соответствующая ему сила тяги привода становится равной силе сопротивления движению стола.

Второй период времени – от $t = 0$ до $t = t_1$, в котором стол движется с постоянным ускорением a , разгоняясь на отрезке l_1 за прогнозируемое время t_1 до рабочей скорости подачи V_S .

В соответствии с [1] дифференциальное уравнение движения стола при его разгоне до рабочей скорости подачи может быть записано в следующем виде:

$$\ddot{x} + u_m \omega_m \dot{x} + \omega_m^2 x = \omega_m^2 \frac{V_S}{2t_1} t^2, \quad (1)$$

где x – величина перемещения (координата) стола от начала его движения, мм; u_m – безразмерный коэффициент затухания механических колебаний, связанный с логарифмическим декрементом затухания γ соотношением $\gamma = \pi u_m$ ($\pi = 3,14159 \dots$); ω_m – угловая частота собственных колебаний стола в направлении его движения (c^{-1}), определяемая из соотношения $\omega_m^2 = C_p/m$ (m – масса стола, кг).

Поскольку при постоянном ускорении $V_S = at_1$ и $l_1 = 0,5at_1^2$, то $t_1 = 2l_1/V_S$.

Тогда с учетом начальных условий $x_0 = 0$ и $\dot{x}_0 = 0$ решение дифференциального уравнения (1), описывающего движение стола в период его разгона до рабочей скорости подачи, имеет вид

$$x = \frac{V_S^2}{2l_1\omega_m^2} \left[e^{-\frac{\omega_m u_m t}{2}} \frac{\sin\left(\omega_m \sqrt{1 - u_m^2/4} \cdot t + \varphi_1\right)}{\sqrt{1 - u_m^2/4}} + 0,5t^2\omega_m^2 - \omega_m u_m t + u_m^2 - 1 \right], \quad (2)$$

$$\dot{x} = \frac{V_S^2}{2l_1\omega_m} \left[-e^{-\frac{\omega_m u_m t}{2}} \frac{\sin\left(\omega_m \sqrt{1 - u_m^2/4} \cdot t + \varphi_1 - \varphi_2\right)}{\sqrt{1 - u_m^2/4}} + t\omega_m - u_m \right], \quad (3)$$

$$\ddot{x} = \frac{V_S^2}{2l_1} \left[e^{-\frac{\omega_m u_m t}{2}} \frac{\sin\left(\omega_m \sqrt{1 - u_m^2/4} \cdot t + \varphi_1 - 2\varphi_2\right)}{\sqrt{1 - u_m^2/4}} + 1 \right], \quad (4)$$

где $\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{(1-u_m^2)\sqrt{1-u_m^2/4}}{u_m(1,5-0,5u_m^2)}$, $\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{2\sqrt{1-u_m^2/4}}{u_m}$.

В реальном диапазоне значений u_m ($u_m \approx 0,1 \dots 0,3$) с приемлемой для инженерной практики точностью может быть принято $\sqrt{1-u_m^2/4} \approx 1$, смещение фазы колебаний \dot{x} относительно фазы колебаний x составляет $\varphi_2 \approx \pi/2$, а фазы колебаний \ddot{x} относительно фазы колебаний $x - 2\varphi_2 \approx \pi$. С учетом этого зависимости (2)–(4) могут быть представлены в более удобном для исследований (количество переменных приведено к двум – u_m и q) безразмерном виде:

$$\frac{x}{l_1} = \frac{2}{q^2} \left[e^{-\frac{qu_m t}{2 t_1}} \cdot \sin\left(q \frac{t}{t_1} + \varphi_1\right) + 0,5q^2 \frac{t^2}{t_1^2} - qu_m \frac{t}{t_1} + u_m^2 - 1 \right], \tag{5}$$

$$\frac{\dot{x}}{V_S} = \frac{1}{q} \left[-e^{-\frac{qu_m t}{2 t_1}} \cos\left(\frac{t}{t_1} + \varphi_1\right) + q \frac{t}{t_1} - u_m \right], \tag{6}$$

$$\frac{\ddot{x}}{a} = 1 - e^{-\frac{qu_m t}{2 t_1}} \left[\sin\left(q \frac{t}{t_1} + \varphi_1\right) \right], \tag{7}$$

где $q = 2\omega_m l_1 / V_S$ – безразмерный параметр, комплексно учитывающий соотношение длины холостого хода l_1 при разгоне стола до рабочей скорости подачи V_S , величину этой подачи и угловую частоту собственных колебаний стола ω_m в направлении его движения.

В момент времени t_{V_S} достижения столом скорости рабочей подачи V_S уравнение (6) может быть представлено в следующем виде:

$$\frac{t_{V_S}}{t_1} = \frac{e^{-\frac{qu_m t_{V_S}}{2 t_1}} \cos\left(\frac{t_{V_S}}{t_1} + \varphi_1\right)}{q}. \tag{8}$$

В работе [1] показано, что скоростным режимам резания соответствуют значения безразмерного параметра q , равные $q = 2 \div 12$. Поэтому дальнейшие исследования были проведены для данного диапазона величин q .

Результаты и их обсуждение. Решение трансцендентного уравнения (8) приведено в графическом виде на рис. 2, а, а соответствующие этому моменту времени, то есть достижению столом рабочей скорости подачи, отношения l_{V_S}/l_1 и \ddot{x}_{V_S}/a , которые характеризуют соответственно погрешность координатного положения стола и его ускорение, – на рис. 2, б.

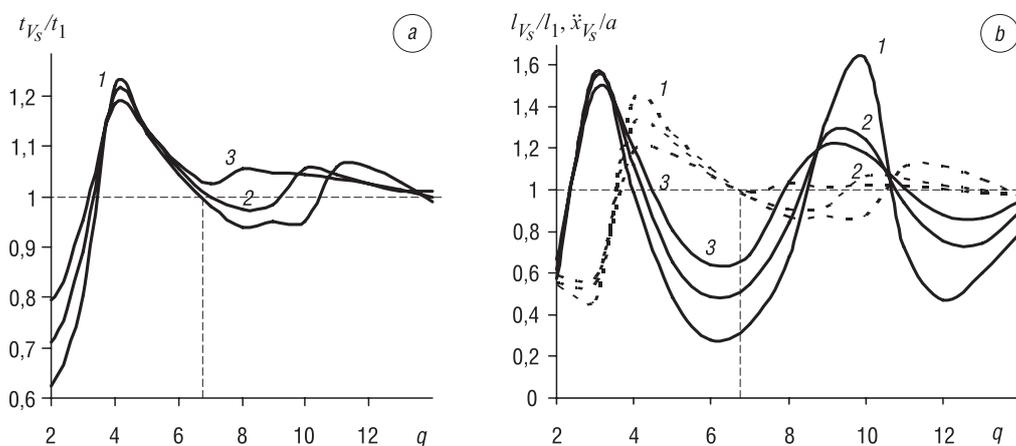


Рис. 2. Закономерности изменения t_{V_S}/t_1 (а) и соответствующих t_{V_S}/t_1 отношений l_{V_S}/l_1 (---) и \ddot{x}_{V_S}/a (—) стола (б) при увеличении значения безразмерного параметра q от 2 до 12: 1, 2, 3 – значения u_m , соответственно равные 0,1, 0,2 и 0,3
 Fig. 2. Regularities of change of t_{V_S}/t_1 (a) and corresponding t_{V_S}/t_1 relations of l_{V_S}/l_1 (---) and \ddot{x}_{V_S}/a (—) of table (b) at increase of value of the dimensionless parameter q from 2 to 12: 1, 2, 3 – u_m values, respectively equal 0.1, 0.2 and 0.3

Анализ рис. 2 показывает, что возникновение механических колебаний стола с частотой его собственных колебаний в направлении движения в процессе его разгона до рабочей скорости подачи при скоростной обработке полупроводниковых пластин в процессе их разделения на кристаллы приводит к тому, что действительные время достижения столом рабочей скорости подачи (рис. 2, *a*), а также координата его расположения и ускорение могут значительно отличаться от прогнозируемых. При этом величины этих отличий периодически изменяются. Они существенно зависят от значения безразмерного параметра q , то есть соотношения длины холостого хода l_1 при разгоне стола до рабочей скорости подачи V_S , величины этой подачи и угловой частоты собственных колебаний стола ω_m в направлении его движения, а также от демпфирующих свойств механической системы. С увеличением q величины отклонений действительных координаты и ускорения от прогнозируемых снижаются. Эти отличия по времени могут достигать 20 % и более (рис. 2, *a*), по координате – 20÷40 %, то есть для длины рабочего хода $l_1 = 10$ мм они составят 2÷4 мм при допустимой величине отклонения не более 0,05 мм, а по ускорению – в 1,2÷1,6 раза (рис. 2, *b*).

Вместе с тем может быть подобрано и обеспечено на стадии проектирования или отладки оборудования для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы такое соотношение длины холостого хода l_1 , величины рабочей скорости подачи V_S , угловой частоты собственных колебаний стола ω_m , при котором контролируемое системой управления оборудованием время достижения столом рабочей скорости подачи и координата его расположения будут практически совпадать с планируемым, а ускорение – ниже прогнозируемого в 1,4–4 раза. В рассматриваемом случае это значение $q \approx 6,3$ (см. рис. 2).

В [1] показано, что такая величина q может быть комплексно обеспечена подбором и программно-управляемым варьированием жесткостью зубчато-ременной передачи путем изменения ее натяжения, технически обоснованным выбором массы стола с учетом планируемых режимов обработки и экономически обоснованным назначением длины холостого хода.

Реализация этого подхода позволяет создать качественно лучшие условия динамического взаимодействия алмазного круга с полупроводниковой пластиной и вследствие этого существенно уменьшить или исключить их сколы и поломки. Значительно шире становятся возможности реализации повышенных в 1,5–2 раза скоростей обработки с использованием современных инструментальных материалов, уменьшения толщины полупроводниковых пластин и увеличения их диаметра. Вместе с тем для радикального решения проблем, обусловленных механическими колебаниями рабочего стола при его разгоне до рабочей скорости подачи, может быть использовано разработанное в Объединенном институте машиностроения НАН Беларуси техническое решение с комбинированной системой привода и специализированными алгоритмами управления тяговым усилием при его разгоне до рабочей скорости подачи (Патент ЕА №024502, МПК 6 В23Q 5/28, Н02К 41/035 «Привод перемещения координатного устройства и способ его управления»; Патент Республики Беларусь №20689, МПК 6 В 23Q 5/22 «Привод перемещения координатного устройства для подачи режущего инструмента»). Схема одного из таких решений показана на рис. 3.

К основной особенности приведенной на рис. 3 комбинированной системы приводов можно отнести наличие непосредственно связанного со столом двухфазного линейного электродвигателя, формирующего при разгоне стола одновременно с основным, создаваемым приводом с зубчато-ременной передачей, дополнительное тяговое усилие.

Алгоритм управления основным и дополнительным тяговыми усилиями комбинированного привода перемещения координатного устройства определяется исходя из следующего:

изменение во времени t основного тягового усилия F_{dc} , обеспечивающего упругое растяжение зубчатого ремня до величины F_{xx} , соответствующей его упругому растяжению при движении стола в режиме холостого хода со скоростью подачи V_S , принято линейным, то есть

$$F_{dc}(t) = k_d F_{xx}(t + t_1); \quad (9)$$

изменение дополнительного тягового усилия по времени t принято параболическим, то есть

$$F_{da}(t) = k_{da} F_{xx} - k_a F_{xx}(t - 0,5t_1 - 0,5t_0)^2, \quad (10)$$

где k_d – коэффициент пропорциональности изменения величины F_{dc} во времени t , c^{-1} ; t – текущее время, с; t_1 – время, за которое скорость подачи стола достигнет требуемой величины, с; t_0 – вре-

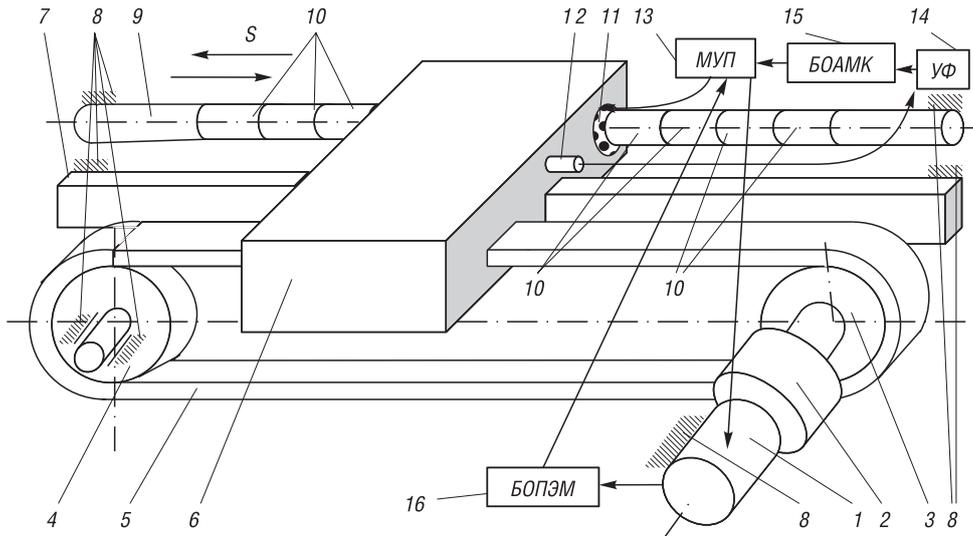


Рис. 3. Условная схема комбинированной системы привода установки для разделения полупроводниковых пластин на кристаллы: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3, 4 – шкивы зубчато-ременной передачи; 5 – зубчатый ремень; 6 – стол, жестко связанный с зубчатым ремнем 5 посредством зубчатой рейки; 7 – направляющая; 8 – основание; 9 – статор двухфазного линейного электродвигателя; 10 – постоянные магниты статора в виде втулок, входящих с зазором в сквозное отверстие в столе 6, выполненное параллельно направляющей 7; 11 – якорь двухфазного линейного электродвигателя, состоящий из коаксиально установленных по отношению к постоянным магнитам 10 статора двух кольцевых катушек индуктивности, размещенных последовательно вдоль оси вала 9 в отверстии подвижного стола 6; 12 – пьезоэлектрический датчик для контроля параметров колебаний подвижного стола 6 в направлении его движения; 13 – программируемый модуль управления приводом (МУП); 14 – узкополосный фильтр (УФ); 15 – блок определения амплитуды механических колебаний стола с частотой собственных колебаний (БОАМК); 16 – блок определения потребляемой электродвигателем мощности (БОПЭМ)

Fig. 3. The conditional scheme of the combined system of the drive of installation for wafer separation: 1 – electric motor; 2 – reducer; 3, 4 – sheaves of the tooth-belt drive; 5 – gear belt; 6 – the table bound to a gear belt 5 by means of a gear rack; 7 – guide; 8 – basis; 9 – stator of the two-phase linear electric motor; 10 – permanent magnets of the stator in the form of plugs and entering with a gap the through hole in a table 6 executed parallel to a guide 7; 11 – the anchor of the two-phase linear electric motor consisting of two toroidal coils which are coaxially established in relation to permanent magnets 10 of stator casing placed sequentially along an axis of a shaft 9 in an opening of the sliding table 6; 12 – a piezoelectric sensor for monitoring of oscillation properties of the sliding table 6 in the direction of its driving; 13 – programmable module of control of the drive (MCD); 14 – narrow-band filter (NBF); 15 – the block of determination of amplitude of mechanical oscillations of a table with a natural frequency (BOAMK); 16 – block of determination of the power consumed by the electric motor (BDPCEM)

мя начала формирования основного и дополнительного тяговых усилий, c ; k_{da} – безразмерное отношение максимального значения дополнительного тягового усилия к тяговому усилию холостого хода; k_a – коэффициент, характеризующий отношение максимального значения F_{da} к F_{xx} и имеющий размерность c^{-2} .

Так как в момент времени t_1 величина основного тягового усилия достигает значения F_{xx} , то

$$F_{dc_{t=tp}} = F_{xx} = k_d F_{xx}(t_1 + t_0), \quad (11)$$

откуда

$$k_d = 1/(t_1 + t_0), \quad (12)$$

где $k = \frac{1}{1 - t_0/t_1}$ (т. к. $t_0 < 0$, то $-1 < t_0/t_1 < 0$ и k всегда лежит в диапазоне $0 < k < 1$).

Тогда выражение (10) может быть приведено к виду

$$F_{dc}(t) = F_{xx}[1 - k(1 - t/t_1)]. \quad (13)$$

Так как в соответствии с принятыми условиями разгона стола при $t = t_1$ его ускорение и $F_{da} = 0$, то

$$k_{da} = 0,25k_a \frac{t_1^2}{k^2}. \quad (14)$$

Тогда

$$F_{da}(t) = k_a k F_{xx} t_1^2 \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \left[1 - k \left(1 - \frac{t}{t_1}\right)\right]. \quad (15)$$

При $t = 0$ суммарное тяговое усилие привода F равно F_{xx} , то есть

$$F_{t=0} = k_a F_{xx} \frac{t_1^2}{k} (1-k) + F_{xx} (1-k), \quad (16)$$

откуда

$$k_a = \frac{k^2}{t_1^2 (1-k)}. \quad (17)$$

Тогда

$$F_{da}(t) = F_{xx} \frac{k^3}{(1-k)} \left(1 - \frac{t}{t_1}\right) \left[1 - k \left(1 - \frac{t}{t_1}\right)\right]. \quad (18)$$

При реализации предлагаемого способа управления тяговым усилием одновременно с линейным электродвигателем, создающим дополнительное тяговое усилие F_{da} , как это показано на рис. 4, основным электродвигателем привода перемещения координатного устройства через редуктор и ременную зубчатую передачу в течение времени $t_1 + t_0$ создается составляющая тягового усилия F_{ds} , необходимая, при достижении основным тяговым усилием значения F_{xx} и скорости подачи V_S , для дальнейшего перемещения стола по направляющей до контакта алмазного круга с полупроводниковой пластиной.

Величина усилия F_{xx} определяется потерями на трение в контактирующих сопряжениях направляющей и стола и сопротивлением деформации траков для подвода электроэнергии к размещенным на столе компонентам привода и системы контроля.

Реализация приведенной выше схемы позволяет при разгоне стола до рабочей скорости подачи V_S практически исключить возникновение механических колебаний стола с собственными частотами.

Исполнение данного технического решения существенно сложнее традиционного, однако при его технически и экономически обоснованном применении механические колебания стола с собственными частотами практически могут быть исключены.

Заключение. Установлено, что возникновение при разгоне стола до рабочей скорости подачи при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы с использованием скоростных режимов обработки механических колебаний, имеющих частоты собственных колебаний, приводит к тому, что действительная координата расположения стола, его ускорение и время холостого хода в момент достижения требуемой скорости могут значительно отличаться от прогнозируемых.

Это может быть причиной возникновения ударов в начальный момент взаимодействия алмазного круга с полупроводниковой пластиной, приводящих к их сколам и поломкам.

Величины отклонений координаты и ускорений зависят от безразмерного соотношения q длины холостого хода l_1 , величины рабочей скорости подачи V_S , угловой частоты собственных колебаний стола ω_m , при этом с увеличением q эти отклонения периодически изменяются. Вследствие этого может быть подобрана и обеспечена такая величина соотношения q , при которой координата расположения стола и время холостого хода будут практически совпадать с планируемыми, а ускорение – ниже прогнозируемого в 1,4–4 раза, то есть допускается использование механических колебаний для существенного по-

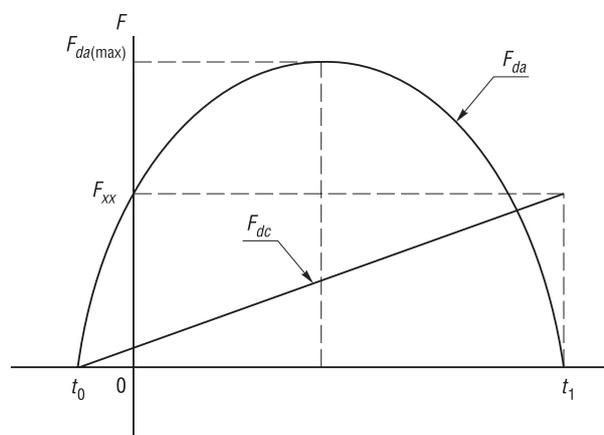


Рис. 4. Схема изменения основного и дополнительного тяговых усилий в комбинированной системе приводов
Fig. 4. Scheme of change of the primary and follow-up mowing forces in the combined system of drives

вышения плавности взаимодействия алмазного диска с полупроводниковой пластиной при их начальном контакте. Это позволит снизить вероятность возникновения или исключить сколы и поломки полупроводниковой пластины и алмазного инструмента, повысить скорость обработки в 1,5–2 раза, обрабатывать пластины с меньшей толщиной и большим диаметром.

Возможно создание комбинированной приводной системы с дополнительным, связанным непосредственно со столом приводом прямого действия, который функционирует только при разгоне и остановке стола, и специальными алгоритмами и системами управления. Их использование позволит на порядок и более снизить или исключить полностью возникновение механических колебаний при разделении полупроводниковых пластин на кристаллы.

Список использованных источников

1. Папина, С. С. Комбинированные приводы координатных систем для прецизионного разделения полупроводниковых пластин на кристаллы / С. С. Папина, В. Л. Басинюк. – Минск: РИПО, 2016. – 118 с.
2. Effect of damping parameters on dynamic behavior of program controllable drives of coordinate systems with belt drive. Part 1 / V. L. Basinyuk [et al.] // *J. of Friction and Wear*. – 2013. – Vol. 34, № 5. – P. 362–367.

References

1. Papina S. S., Basinyuk V. L. *The combined drives of coordinate systems for high-precision division of semiconductor plates into crystals: monograph*. Minsk, Republican Institute of Vocational Education, 2016. 118 p. (in Russian).
2. Basinyuk V. L., Mardosevich E. I., Papina S. S., Lomako V. G. Effect of damping parameters on dynamic behavior of program controllable drives of coordinate systems with belt drive. Part 1. *Journal of Friction and Wear*, 2013, vol. 34, no. 5, pp. 362–367. DOI: 10.3103/s1068366613050024

Информация об авторе

Басинюк Владимир Леонидович – доктор технических наук, доцент, директор научно-технического центра – заведующий лабораторией, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vladbas@mail.ru

Information about the author

Uladzimir L. Basiniuk – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Director of the Scientific & Engineering Centre – Head of the Laboratory, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vladbas@mail.ru

П. А. Амельченко¹, Д. А. Дубовик¹, А. В. Ключников², А. В. Ващула³

¹*Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

²*МТЗ-ХОЛДИНГ, Минск, Беларусь*

³*Белорусская машиноиспытательная станция, Привольный, Минский район, Беларусь*

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ СЕЛЬХОЗТРАКТОРОСТРОЕНИЯ

Аннотация. Установлено, что важнейшие направления развития конструкции сельскохозяйственных тракторов основаны на увеличении их производительности. Увеличение производительности осуществляется посредством повышения как энергонасыщенности, так и универсальности, позволяющей увеличить время непрерывной работы и коэффициент использования трактора. Определено, что повышение энергонасыщенности обеспечивается за счет увеличения мощности силового агрегата колесных тракторов до 600 л.с., а также дополнения модельных рядов гусеничными тракторами нового технического уровня, близко унифицированными с колесными моделями аналогичной мощности. При этом ведущие производители тракторной техники разрабатывают концепцию сельскохозяйственного трактора с двигателем мощностью свыше 500 л.с. Увеличение универсальности тракторов сопровождается развитием их конструкции, обеспечивающим увеличение максимальных и средних скоростей движения. Увеличение транспортных скоростей до 50–60 км/ч и более достигается за счет совершенствования ступенчатых коробок передач, разработки и внедрения бесступенчатых трансмиссий, использования и улучшения характеристик подвесок переднего ведущего моста (ПВМ), кабины и сиденья оператора, применения тормозов колес ПВМ, антиблокировочных и противобуксовочных систем, всеколесного рулевого управления. Подробно рассмотрены особенности конструкции концептуальных моделей тракторов Fendt TRISIX Vario с двигателем MAN D2 676 мощностью 540 л.с. и колесной формулой 6×6, DEUTZ-FAHR Agro XXL с двигателем DEUTZ TCD 2015 мощностью 600 л.с. и колесной формулой 8×8, New Holland NH2 на водородных топливных элементах. Показано, что для повышения технического уровня тракторной техники большое внимание уделяется улучшению условий труда оператора, в том числе путем совершенствования конструкции, улучшения эргономических и эстетических свойств кабин, внедрения бортовых электронных систем контроля, диагностики и управления. Для снижения издержек и повышения эффективности сельскохозяйственного производства осуществляется все более широкое применение систем точного земледелия.

Ключевые слова: трактор сельскохозяйственного назначения, тракторостроение, высокоэнергонасыщенный трактор, тенденции развития, двигатель, синхронизированная коробка передач, бесступенчатая передача, трансмиссия, передний ведущий мост, кабина, сиденье, рулевое управление, тормозная система, подвеска, условия труда

Для цитирования. Современные тенденции сельхозтракторостроения / П. А. Амельченко [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 76–92.

P. A. Amelchenko¹, D. A. Doubovik¹, A. V. Klyuchnikov², A. V. Vaschula³

¹*Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*MTZ-HOLDING, Minsk, Belarus*

³*Belorussian Machine Testing Station, Privolny, Minsk district, Belarus*

MODERN TENDENCIES OF AGRICULTURAL TRACTORS

Abstract. It is noted that the main components of the quantitative evaluation of the performance of tractors are the indicators of their energy saturation and universality. The key characteristic of tractors of agricultural purpose is the traction class, which characterizes, first of all, the energy saturation of a tractor. Universality of agricultural tractors is characterized, mainly, by their maximum speeds of movement and average speeds of performance of transport works. It has been established that the most important directions for the development of the design of agricultural tractors are based on increasing their productivity. Increasing productivity is achieved by increasing both energy saturation and versatility, which allows to increase the time of continuous operation and the coefficient of using the tractor. It is determined that the increase in energy saturation is ensured by increasing the power of the power unit of wheeled tractors to 600 hp, as well as the addition of model series with new-level caterpillar tractors, closely aligned with wheel-type models of similar power. At the same time, the leading manufacturers of tractors are performing research and development in the development of the concept of an agricultural tractor with an engine of more than 500 hp. The increase in the universality of tractors is accompanied by the development of their construction, which ensures an increase in the maximum and average speeds of movement. The increase in transport speeds of up to 50–60 km/h and more is achieved by the improvement of stepped gearboxes, the development and introduction of

continuously variable transmissions, the use and improvement of the characteristics of the suspension of the front driving axles, the cabin and the operator's seat, the use of brakes of the front driving axle wheels, anti-lock and anti-traction systems, and all-wheel steering. It is shown that to increase the technical level of tractor equipment, great attention is paid to improving the operator's working conditions, including by improving the design, improving the ergonomic and aesthetic properties of the cabins, automating work processes by developing and implementing on-board electronic control systems, diagnostics and controls. To reduce costs and increase the efficiency of agricultural production, the use of precision farming systems is becoming increasingly widespread.

Keywords: agricultural tractor, tractor engineering, high-energy-saturated tractor, development trends, engine, synchronized gearbox, continuously variable transmission, transmission, front drive axle, cabin, seat, steering, braking system, suspension, working conditions

For citation. Amelchenko P. A., Doubovik D. A., Klyuchnikov A. V., Vaschula A. V. Modern tendencies of agricultural tractors. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 76–92 (in Russian).

Введение. В начале XXI в. основным мобильным энергетическим средством в сельскохозяйственном производстве, прежде всего в растениеводстве, остается универсально-пропашной трактор (сельскохозяйственный трактор). По мнению авторов настоящей работы и [1], колесный трактор будет оставаться «рабочей лошадкой» сельского хозяйства и в обозримом будущем.

По прогнозам Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН, в 2050 г. на Земле будет проживать 9,2 млрд населения. Общий объем производства продовольствия потребуется увеличить на 70 %, причем в развивающихся странах его необходимо будет удвоить. Спрос на зерновые культуры возрастет более чем в 1,5 раза и достигнет 3 млрд т, а в случае интенсивного распространения использования их для производства биотоплива спрос на эти культуры может значительно повыситься. Будущий рост требуемых объемов продовольствия и, соответственно, потребности в средствах его производства делает рынок тракторов для сельского хозяйства одним из наиболее динамично развивающихся. В докризисные годы середины первого десятилетия XXI в. продажи тракторов ежегодно прирастали, причем прирост рынка достигал 30 %.

Для устойчивого присутствия и укрепления своих позиций на рынке ведущие производители тракторной техники наращивают объем научно-исследовательских, опытно-конструкторских и опытно-технологических работ (НИОКР). Годовой объем НИОКР в тракторостроении на текущий момент уже превышает несколько миллиардов долларов США. У одной только корпорации John Deere затраты на научные исследования и разработки достигают 1 млрд долл. США в год.

Мировой финансовый кризис 2008 года вызвал падение рынков, привел к снижению продаж, в том числе сельскохозяйственных тракторов, и обострил конкуренцию между машиностроительными компаниями. Стремясь сохранить свои позиции на рынке и минимизировать падение продаж, ведущие производители были вынуждены активизировать НИОКР по разработке и внедрению инноваций и ускорить выход на рынок новых моделей тракторов.

Для разработчиков и производителей тракторной техники, как и для научных работников, практический интерес представляет, посредством сочетания каких технических решений обеспечивается конкурентоспособность сельскохозяйственных тракторов, а также направления дальнейшего развития их конструкции.

Целью настоящих исследований является выявление основных тенденций развития конструкции тракторов сельскохозяйственного назначения на рубеже XX–XXI вв. по результатам анализа материалов важнейших выставок сельскохозяйственной техники, патентной и научно-технической литературы.

Повышение энергонасыщенности. Наиболее энергозатратными видами работ в сельском хозяйстве являются полевые работы по обработке почвы. Их эффективность и производительность тракторной техники находятся в прямой зависимости от количества производимой в единицу времени или же за один проход трактора полезной работы $A_{\text{п}}$. Последняя может быть выражена через размеры обрабатываемой площади $S_{\text{об}}$, вид и количество выполняемых технологических операций $i_{\text{оп}}$ за один проход:

$$A_{\text{п}} = f(S_{\text{об}}, i_{\text{оп}}). \quad (1)$$

Как видно из (1), величина выполняемой в единицу времени полезной работы $A_{\text{п}}$ определяется способностью трактора одновременно приводить в действие наибольшее количество сельскохозяйственных орудий и машин определенной ширины захвата. Поэтому ключевой характеристикой тракторов является рассчитываемый по ГОСТ 27021-86 тяговый класс, показывающий не только номинальное тяговое усилие трактора и в пересчете необходимую величину мощности силового агрегата, но и насколько эффективна конструкция самого трактора при имеющейся у него эксплуатационной массе.

Из выражения (1) следует, что повышению производительности тракторной техники при наличии в хозяйствах достаточных площадей обрабатываемых земель способствует увеличение мощности ее двигателя. Поэтому одной из основных тенденций тракторостроения является повышение энергонасыщенности сельскохозяйственных тракторов. Ведущие тракторопроизводители активно занимаются расширением модельных рядов выпускаемой техники, преимущественно путем разработки и освоения производства высокоэнергонасыщенных тракторов (рис. 1).

При этом принято считать, что колесные тракторы с двигателем мощностью до 350 л.с., как правило, имеют классическую компоновку с колесами разной размерности на переднем и заднем мостах. Колесные тракторы с двигателем мощностью более 350 л.с. выполняются по шарнирно-сочлененной схеме с одинаковыми колесами [2].

Вместе с тем следует отметить, что в начале XXI в. наметилась тенденция повышения мощности колесных тракторов классической компоновки. Компания Fendt выпустила на рынок самый мощный колесный трактор классической компоновки – Fendt 1050 с двигателем мощностью 500 л.с. и трансмиссией VarioDrive (рис. 2, *a*). Холдинг «МТЗ-ХОЛДИНГ» также поддерживает тенденцию роста мощности тракторов классической компоновки, разработав трактор «Беларус 4522» с двигателем мощностью 466 л.с. и гидромеханической трансмиссией 16×8 , который на сегодняшний день является вторым по мощности трактором подобной компоновки в мире (рис. 2, *b*).

Реализация данной тенденции сопровождается обострением конкуренции разных концепций и актуализацией непрерывной «борьбы» между колесными и гусеничными тракторами, осуществляемой последними техническими достижениями в области конструкции движителя. По мере роста мощностей колесных тракторов все более критическими становятся ограничения по давлению на почву, массе и габаритам, которые подошли к пределу по ширине с позиций выхода на дороги общего пользования. Одновременно появились новые конкурентоспособные решения по резиноармированным гусеницам. Поэтому в сегменте дорогой и тяжелой высокопроизводительной техники крупнейшие фирмы, например, такие как John Deere, CASE New Holland, AGCO, начали производить гусеничные тракторы нового технического уровня (см. рис. 1, *d–f*), близко унифицированные с колесными моделями аналогичной мощности.

В колесных тракторах при современных параметрах шин повышение мощности двигателя свыше 500 л.с. требует поиска новых компоновочных решений, чем активно занимаются ведущие производители тракторной техники.

Одно из таких решений предложила компания Fendt в своей концептуальной разработке TRISIX Vario (см. рис. 1, *g*), сочетающей в себе преимущества колесных и гусеничных тракторов [3]. Шесть идущих по одной колее одинаковых шин 650/65 R 38 на колесах трех ведущих мостов увеличивают контактную площадь опоры Fendt TRISIX Vario примерно на 70 % по сравнению с двухосными тракторами с шарнирно-сочлененной рамой. Последним для реализации полной мощности двигателя необходима установка сдвоенных или даже строенных колес, которая накладывает ограничения на движение по дорогам общего пользования. Удовлетворительная поворачиваемость TRISIX Vario достигается синхронным поворотом колес переднего и заднего мостов. Пружинная подвеска полуосей обеспечивает устойчивость трактора при раскачивании и выравнивание его положения на склонах. Крутящий момент от двигателя через раздаточную коробку передается на две коробки передач Vario типа ML-260, из которых одна кинематически связана с колесами передних мостов, вторая приводит в действие ведущие колеса заднего моста. Двигатель MAN D2676 с максимальными мощностью 540 л.с. и крутящим моментом 2400 Нм и тормозная система с ABS обеспечивают движение TRISIX Vario, в том числе по дорогам общего пользования, со скоростью 65 км/ч. При скорости свыше 30 км/ч управление колесами заднего моста автоматически блокируется и управляемыми остаются только колеса переднего моста.



Рис. 1. Энергонасыщенные тракторы сельскохозяйственного назначения: *a* – Claas XERION 5000 с двигателем Catterpillar C13 мощностью 524 л.с.; *b* – New Holland T9.615 с двигателем FPT Cursor 13 мощностью 613 л.с.; *c* – Case IH Steiger 600 с двигателем Iveco Cursor мощностью 608 л.с.; *d* – Versatile 550DT с двигателем Cummins QSX15 мощностью 591 л.с.; *e* – John Deere 9560RT с двигателем PowerTech мощностью 616 л.с.; *f* – CASE New Holland T9 670 с двигателем FPT Cursor 13 мощностью 669 л.с.; *g* – Fendt TRISIX Vario с двигателем MAN D2676 мощностью 540 л.с.; *h* – Deutz-Fahr Agro XXL с двигателем DEUTZ TCD 2015 мощностью 600 л.с.

Fig. 1. Energy-saturated tractors for agricultural purposes: *a* – Claas XERION 5000 with the engine Catterpillar C13 with the power of 524 hp; *b* – New Holland T9.615 with the engine FPT Cursor 13 with the power of 613 hp; *c* – Case IH Steiger 600 with the engine Iveco Cursor with the power of 608 hp; *d* – Versatile 550DT with the engine Cummins QSX15 with the power of 591 hp; *e* – John Deere 9560RT with the engine PowerTech with the power of 616 hp; *f* – CASE New Holland T9 670 with the engine FPT Cursor 13 with the power of 669 hp; *g* – Fendt TRISIX Vario with the engine MAN D2676 with the power of 540 hp; *h* – Deutz-Fahr Agro XXL with the engine DEUTZ TCD 2015 with the power of 600 hp



Рис. 2. Колесные тракторы классической компоновки с двигателями мощностью свыше 350 л.с.: *a* – Fendt 1050 с двигателем MAN объемом 12,4 л мощностью 500 л.с.; *b* – «Беларус 4522» с двигателем Catterpillar C13 мощностью 466 л.с.
 Fig. 2. Wheeled tractors of the classic configuration with engines over 350 hp: *a* – Fendt 1050 with the engine MAN with the power of 500 hp; *b* – “Belarus 4522” with the engine Catterpillar C13 with the power of 466 hp

Заслуживает внимания также и концептуальная модель трактора DEUTZ-FAHR Agro XXL (рис. 1, *h*), представленная компанией DEUTZ-FAHR по результатам научных исследований «относительно силы тяги и почвенного грунта», выполненных при поддержке правительства федеральной земли Тюринген [4]. В основу концепции трактора Agro XXL положена задача поиска и проработки технических решений для повышения энергонасыщенности и дальнейшего совершенствования конструкции сельскохозяйственных тракторов. Решение данной задачи предполагает устранение недостатков конструкции двухосных колесных тракторов с шарнирно-сочлененной рамой, обычно не вписывающихся в дорожный габарит и, как следствие, имеющих соответствующее ограничение движения по дорогам общего пользования, и гусеничных тракторов, достигающих предела своих возможностей в сырую погоду.

Для преодоления указанных ограничений тракторов традиционной компоновки у трактора Agro XXL количество ведущих колес увеличено до 8. Причем все они имеют одинаковый диаметр и расположены по базе в одной колее равномерно по передней и задней секциям. Крутящий момент от двигателя передается переключаемой под нагрузкой коробке передач с 18 передачами переднего хода и шестью передачами заднего хода, а затем распределяется между четырьмя редукторами, приводящими в действие по паре колес одного борта. Восьмицилиндровый V-образный двигатель DEUTZ TCD 2015 объемом 15,9 л с турбонаддувом и системой охлаждения надувочного воздуха развивает мощность 600 л.с. Крутящий момент достигает своего максимального значения 2800 Нм уже при 1300–1500 об/мин коленчатого вала. Максимальные скорости переднего и заднего хода трактора составляют соответственно 40 и 12,7 км/ч. При выполнении транспортных работ привод четырех колес задней секции отключается. Поворот трактора Agro XXL осуществляется за счет шарнирного соединения двух секций. При ширине 2,85 м и длине 8,9 м диаметр разворота трактора по траектории качения внешних колес составляет 17,5 м.

По информации производителя, тяговое усилие трактора Agro XXL, на который могут устанавливаться шины как 600/70 R30, так и 750/75 R26, составляет 12,5 т. Платформа оснащена системой быстрой стыковки с контейнерами Jost и имеет шаровое сцепное устройство для полуприцепа, например для транспортировки цистерны с навозной жижей. В задней части трактора расположено обычное крепление для нормальной тяговой серьги. Главной точкой сцепления орудий является расположенное в задней части маятниковое сцепное устройство, позволяющее при маневрировании в колее снизить колебательные движения, характерные для шарнирно-сочлененного трактора.

Поскольку восемь колес с таким шасси могут реализовывать более высокое тяговое усилие, разработчики Agro XXL заявляют, что существуют возможности дальнейшего развития данного трактора.

Повышение универсальности. Особенностью современных сельскохозяйственных тракторов является то, что они используются для выполнения различных видов работ. Наряду с выполнением полевых работ по обработке почвы, они широко применяются для транспортных работ.

Причем доля транспортных работ постоянно растет. Уже в начале XXI в. для универсально-пропашных тракторов тягового класса 1,4 транспортные внутрихозяйственные перевозки составляют от 25 до 60 % от общего объема выполняемых ими работ [5] в зависимости от хозяйства, в котором они используются.

В качестве критерия для количественной оценки эффективности транспортных работ широкое распространение получила удельная производительность, определяемая по РТМ 37.031.007-78. Применительно к тракторной технике выражение для расчета удельной производительности может быть представлено в виде

$$w_{tr} = \frac{m_{гр} v_{ср}}{Q_{ср}}, \quad (2)$$

где $m_{гр}$ – масса перевозимого груза, кг; $v_{ср}$ – средняя скорость транспортировки груза, км/моточас; $Q_{ср}$ – средний расход топлива, л/моточас.

Из выражения (2) следует, что повышение удельной производительности тракторной техники w_{tr} при выполнении ею транспортных работ следует связывать как с уменьшением среднего расхода топлива $Q_{ср}$ силового агрегата [6], так и с увеличением массы перевозимого груза $m_{гр}$ и повышением средней скорости $v_{ср}$ его транспортировки.

Увеличение находящегося в прямопропорциональной зависимости от массы перевозимого груза $m_{гр}$ сопротивления движению компенсируется увеличением мощности силового агрегата при повышении энергонасыщенности трактора.

Конструктивно увеличение средних скоростей $v_{ср}$ движения достигается дальнейшим развитием и разработкой принципиально новых трансмиссий [7]. Поскольку характеристики трансмиссий во многом определяют не только технический уровень тракторов, а вместе с тем и их стоимость, ведущие производители тракторной техники для расширения своего присутствия в разных сегментах рынка выпускают тракторы с разными типами трансмиссий. В зависимости от мощности двигателя и требований потребителей в конструкции сельскохозяйственных тракторов применяются синхронизированные коробки передач с переключением передач на ходу (без остановки трактора), трансмиссии с переключением передач под нагрузкой (так называемые в зарубежной литературе PowerShift) и бесступенчатые трансмиссии (Continuously Variable Transmission, CVT) [2].

Среди бесступенчатых трансмиссий сельскохозяйственных тракторов наибольшее распространение получили двухпоточные гидрообъемно-механические трансмиссии (ГОМТ). Первой ГОМТ на рынке сельскохозяйственных тракторов стала представленная на выставке Agritechnica в 1995 г. в составе трактора Fendt модели Favorit 926 Varío и прошедшая свою дальнейшую модернизацию бесступенчатая коробка передач Fendt Varío (рис. 3) [8].

К преимуществам трансмиссии Fendt Varío разработчики относят особенности ее функциональной схемы, которая содержит всего четыре пары шестерен вместо более 30 шестерен в традиционных коробках передач. При этом положительной особенностью является устранение жесткой механической связи между двигателем и ведущими колесами [9]. Тем самым обеспечивается плавное регулирование скорости в диапазоне от 0 до 60 км/ч, бесступенчатое изменение направления движения и снижение пиковых нагрузок в силовом приводе трактора, исключается необходимость в ходоуменьшителе.

В состав трансмиссии входят регулируемые насос и два гидромотора с максимальным отклонением блока цилиндров до 45°. Трогание трактора происходит в режиме прохождения всей мощности двигателя через гидрообъемную передачу (ГОП). С ростом скорости движения трактора увеличивается доля мощности, проходящая через механическую ветвь. Максимальная скорость 60 км/ч достигается при экономичной частоте вращения 1950 об/мин коленчатого вала двигателя.

В соответствии с описанием работы трансмиссии [10] в начале движения параметр регулирования насоса $e_1 = 0$, параметры регулирования гидромоторов $e_2 = 1$. При увеличении параметра регулирования e_1 от 0 до 1 при выбранных конструктивных параметрах трансмиссии скорость трактора растет от 0 до 6 км/ч. Затем, при фиксированном значении $e_1 = 1$ параметр регулирования гидромоторов e_2 снижается с 1,0 до 0,5, что вызывает увеличение скорости от 6 до 9 км/ч.

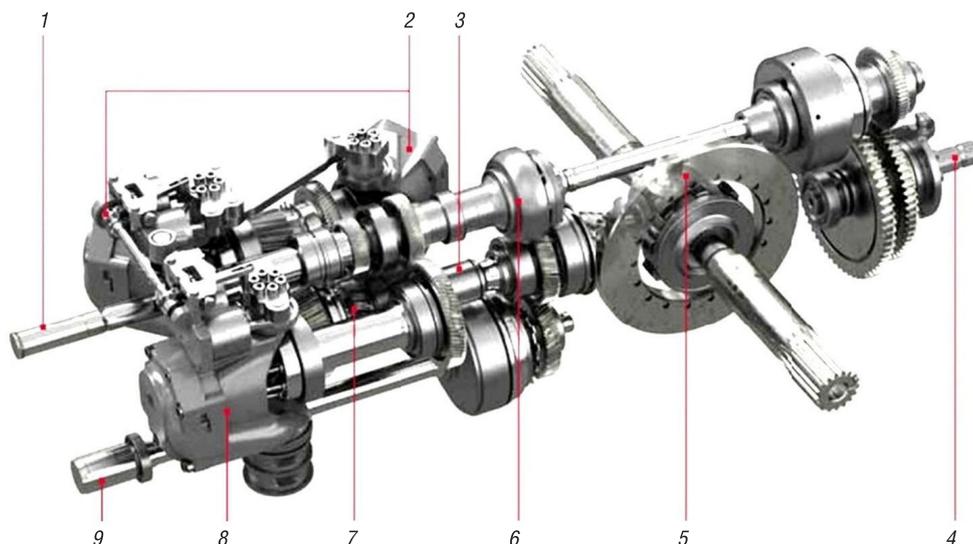


Рис. 3. Трансмиссия Fendt Vario: 1 – первичный вал, 2 – гидромотор, 3 – вал коллектора, 4 – вал отбора мощности (ВОМ), 5 – шестерня главной передачи, 6 – набор планетарных шестерен, 7 – шестерни диапазонов, 8 – гидравлический насос, 9 – вал привода переднего ведущего моста (ПВМ)

Fig. 3. Transmission Fendt Vario: 1 – the primary shaft, 2 – the hydraulic motor, 3 – the collector shaft, 4 – power take-off shaft (PTO), 5 – the gear wheel of the main transfer, 6 – set of planetary gears gearbox, 7 – gears of ranges, 8 – the hydraulic pump, 9 – the drive shaft of the front drive axle (FDA)

При этом через гидравлическую ветвь передается 75 %, а через механическую – 25 % мощности двигателя. Синхронное уменьшение параметров регулирования гидромоторов производится только после реализации всего диапазона регулирования насоса. Такое применение двухмашинного регулирования в сочетании со связью вала двигателя с водилом суммирующего планетарного ряда на входе трансмиссии исключает циркуляцию мощности с режимами повышенных нагрузок на элементы трансмиссии. В целом это позволило снизить массово-габаритные характеристики ГОМТ.

Применительно к особенностям конструкции гусеничных тракторов производства «МТЗ-ХОЛДИНГ» авторами настоящей работы представлена функциональная схема ГОМТ, описание действия которой приведено в [11].

Для достижения наибольшей экономии топлива управление ГОМТ оптимизируется в составе моторно-трансмиссионной установки трактора за счет выбора передаточных отношений, при которых двигатель работает в режимах минимального удельного расхода топлива. Для удовлетворения ужесточающихся норм Tier по выбросам вредных веществ производители тракторной техники устанавливают на выпускаемые тракторы двигатели внутреннего сгорания соответствующего экологического класса. При этом ведущие производители продолжают научно-исследовательские работы по поиску, в том числе для сельскохозяйственных тракторов, альтернативных источников энергии, включая газ, рапсовое масло, водород, биогаз.

Так, американская компания New Holland на Парижской сельскохозяйственной выставке в 2009 г. продемонстрировала концептуальную модель колесного трактора New Holland NH2 (рис. 4). Главной конструктивной особенностью данной модели является отсутствие у нее двигателя внутреннего сгорания [12]. Необходимая для движения трактора электрическая энергия вырабатывается в процессе химических реакций при поступлении водорода в топливные элементы.

Топливо-энергетическая система и силовая установка трактора New Holland NH2 разработаны совместными усилиями инженеров New Holland и Iveco. Электрический ток, производимый водородными топливными элементами, приводит в движение два электромотора и снабжает электроэнергией дополнительное оборудование трактора.

Водород, необходимый для работы топливного элемента, находится в специальном баке под давлением в 350 атм. Он подается в топливные элементы через систему понижающих редукто-



Рис. 4. Общий вид (а) и структурная схема (б) концептуальной модели трактора New Holland NH2: 1 – воздушный фильтр, 2 – резервуар для хранения водорода, 3 – топливные элементы, 4 – электродвигатели, 5 – питание вспомогательного оборудования, 6 – мощность для вала отбора мощности (ВОМ), 7 – сила тяги, 8 – внешнее электроснабжение

Fig. 4. General view (a) and block diagram (b) of the conceptual model of the New Holland NH2: 1 – air filter, 2 – hydrogen storage tank, 3 – fuel cells, 4 – electric motors, 5 – power to auxiliary equipment, 6 – power for power take-off shaft (PTO), 7 – power to traction, 8 – external electric supply

ров. Кислород для топливных элементов берется прямо из атмосферы. Запаса водорода в баке хватает New Holland NH2 на 1,5–2,0 ч непрерывного движения.

Топливные элементы трактора генерируют электрическую энергию, которая подается на электромотор. Четыре распределительных устройства передают крутящий момент от электромотора к ведущим колесам. В тракторе отсутствуют механическая коробка передач и муфты. Увеличение или уменьшение скорости движения осуществляется за счет регулирования мощности, подводимой к электромотору. Для изменения направления движения трактора используется изменение полярности напряжения, питающего электромотор.

Единственным звуком трактора New Holland NH2 является звук работы электромотора, поэтому этот трактор характеризуется весьма низким уровнем шума. У этой модели трактора отсутствует выхлопная труба, ее заменила небольшая трубка снизу кабины для стекания воды – единственного продукта работы топливных элементов.

Увеличение скоростей движения сопровождается ростом нагрузок, передаваемых на трактор вместе с оператором от неровностей опорной поверхности и реализуемых режимов эксплуатации (торможение, разгон, движение по криволинейным траекториям). Для защиты трактора и установленного на него сельскохозяйственного оборудования от возрастающих ударных нагрузок и создания комфортных условий для работы оператора одним из общепринятых направлений улучшения конструкции является внедрение и дальнейшее совершенствование подвесок сиденья оператора, кабины, переднего ведущего моста (ПВМ), а иногда и заднего моста. Комплексная виброзащита трактора и рабочего места оператора у ведущих производителей обеспечивается использованием сочетания подвесок сиденья, кабины и ПВМ с согласованием их технических характеристик.

Для ПВМ сельскохозяйственных тракторов, как правило, с межколесными дифференциалами повышенного трения с фрикционными дисковыми муфтами [13] применяется преимущественно независимая гидропневматическая подвеска. Индивидуальная подвеска колес Fendt (рис. 5, а) снабжена мостом со сдвоенным поперечным рычагом, что оптимизирует угол поворота управляемых колес. Автоматический механизм выравнивания обеспечивает одинаковый ход подвески обеих сторон при нагрузке на передний мост до 8 т. Рабочий диапазон подвески можно регулировать вручную. Компания New Holland устанавливает на тракторы серии T7000 активную подвеску переднего моста Terraglide (рис. 5, б). Эта подвеска оснащена акселерометрическим

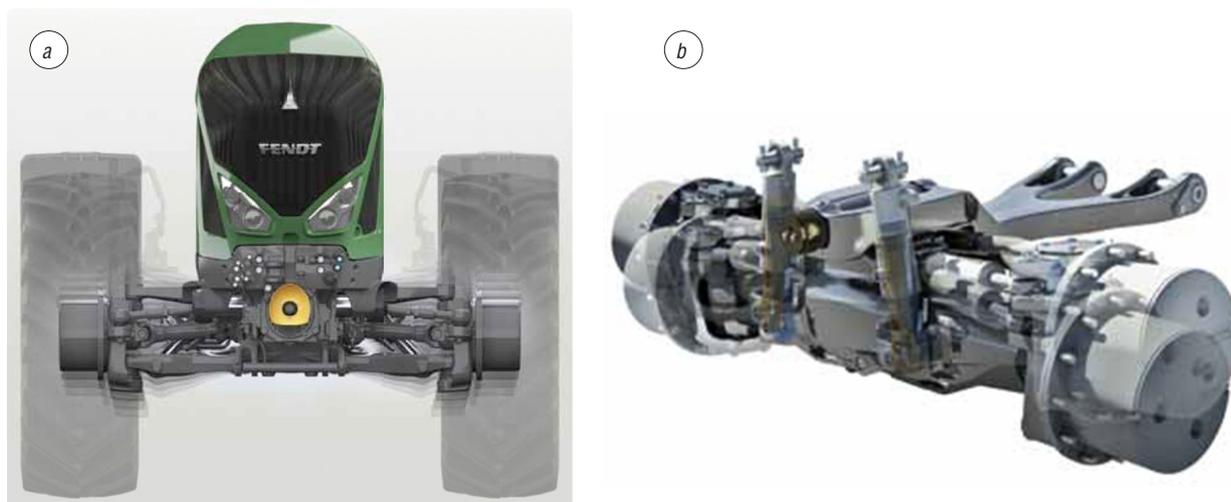


Рис. 5. Подвески передних мостов: *a* – подвеска переднего моста Fendt, *b* – подвеска переднего моста Terraglide NEW HOLLAND

Fig. 5. Suspensions of front axles: *a* – suspension of the front axle Fendt, *b* – suspension of the front axle Terraglide NEW HOLLAND

датчиком и поддерживает функции anti-dive и anti-squat. Функция anti-dive активизируется при резком торможении. Функция anti-squat стабилизирует ПБМ при работе трактора с тяжелым навесным оборудованием. Активная подвеска переднего моста Dana 770 с автоматической системой контроля и регулирования обеспечивает ровное и комфортное вождение по любым поверхностям на любых скоростях [2]. Финская компания Valtra впервые применила на своих тракторах пневматическую подвеску ПБМ. Британская компания JCB Agriculture в тракторах модели Fastrac подрессорила передний и задний ведущие мосты.

Кабина как рабочее место оператора и высокотехнологичный компонент, во многом определяющий технический уровень и внешний облик тракторов, является одним из важнейших объектов интенсивных научных исследований и непрерывного внедрения инноваций. Большое внимание уделяется разработкам и совершенствованию подвески кабин.

Для защиты здоровья и снижения утомляемости оператора инженеры компании Fendt разработали решения, реализованные в пятистоечной кабине x5 (рис. 6, *a*) с пневмоподвеской [8]. Для подвески кабины x5 использована трехточечная схема с интегрированным механизмом регулирования уровня. Для того чтобы развернуть рабочее место оператора, достаточно освободить фиксатор, наклонить рулевую колонку вперед по направлению к сиденью при помощи подвесных пружин, затем развернуть сиденье оператора вместе с панелью управления в требуемом направлении. После разворота сиденья рулевую колонку необходимо вернуть в рабочее положение и зафиксировать в этом положении с помощью фиксатора.

Для установки по желанию потребителей на любой трактор серии T9 компания New Holland разработала четырехточечную подвеску кабины Comfort Ride (рис. 6, *b*). Все четыре угла кабины разработчики поместили на пружины и амортизаторы с оригинальной системой стабилизации, которая обеспечивает плавность и устойчивость при движении трактора [14].

Инженеры компании CLAAS для тракторов модели XERION разработали полуактивную подвеску кабины (рис. 6, *c*) с управляемыми амортизаторами [15]. Электронная система адаптирует степень амортизации подвески к текущим условиям эксплуатации трактора, тем самым улучшая условия работы оператора при выполнении им любых сельскохозяйственных работ. Кабина трактора XERION спроектирована таким образом, чтобы простым нажатием на кнопку ее можно было повернуть на 180°. Причем время разворота кабины составляет менее 30 с.

Для удовлетворения требований как можно большего числа потребителей одни и те же производители тракторной техники предлагают для оператора сиденья с разными типами подвесок, принципами действия и техническими характеристиками. Например, компания Fendt в соответствии с желанием заказчика предлагает ряд из трех сидений (рис. 7).



Рис. 6. Подвески кабин: *a* – пятистоечная кабина трактора Fendt 900 Vario, *b* – подвеска кабины Comfort Ride NEW HOLLAND, *c* – полуактивная подвеска кабины CLAAS

Fig. 6. Suspensions of cabins: *a* – five-post cabin of the tractor Fendt 900 Vario, *b* – cabin suspension Comfort Ride NEW HOLLAND, *c* – semi-active suspension of the cabin CLAAS



Рис. 7. Сиденья компании Fendt: *a* – сиденье Fendt, *b* – сиденье Fendt Evolution Dynamic, *c* – сиденье Fendt Evolution Active

Fig. 7. Seats of the company Fendt: *a* – Fendt seat, *b* – Fendt Evolution Dynamic seat, *c* – Fendt Evolution Active seat

В базовой комплектации кабина оборудуется сиденьем с пневматической подвеской и регулируемым положением подлокотника (рис. 7, *a*). Сиденье повышенной комфортности с пневматической подвеской Fendt Evolution Dynamic оснащается подогревом, поворотным адаптером, низкочастотным амортизатором, пневматической поясничной опорой и простыми регулировками. Кроме того, имеется климат-контроль и динамический амортизатор. Воздушный компрессор расположен снаружи кабины, чтобы его шум не мешал оператору (рис. 7, *b*). В дополнение к функциям сиденья повышенной комфортности его устанавливаемая по заказу высокотехнологичная модификация премиум-класса Fendt Evolution Active (рис. 7, *c*) оснащена активной подвеской. Сиденье Fendt Evolution Active в сочетании с подвесками кабины и ПВМ уменьшает нагрузку на оператора, сохраняя его работоспособность на высоком уровне в течение всего рабочего дня. По желанию потребителя кабина оборудуется поворотным местом оператора. В данном случае кабина выполняется с возможностью поворота всех органов управления и панелей контрольных приборов вместе с сиденьем оператора.

Компания New Holland предоставляет для потребителей своих тракторов возможность установки сиденья Auto Comfort™. Система Auto Comfort™ содержит датчики, которые следят за неровностями опорной поверхности. На основе обработки сигналов этих датчиков осуществляется автоматическое управление демпфером, расположенным под сиденьем. Управление осуществляется посредством регулирования электромагнитного поля, воздействующего на жидкость с чувствительной к нему (к полю) вязкостью, характеристики которой изменяются за несколько миллисекунд. В результате снижается уровень передаваемых оператору вибраций [2].

Более простое и более эффективное управление трактором требует меньше концентрации и, соответственно, улучшает условия работы и снижает энергозатраты оператора на выполнение рабочих операций. В итоге более эффективное рулевое управление и тормозная система уменьшают количество человеко-часов для выполнения одного и того же объема работ, одновременно повышая производительность тракторной техники [16]. Параметры рулевого управления характеризуют величину рассогласования кинематики поворота управляемых колес [17], которое, увеличивая изнашивание шин, снижает эффективность ходовой системы [18].

На большинстве современных тракторов угол поворота управляемых колес передних мостов составляет 50–55°. Компания New Holland на некоторые свои модели устанавливает передний мост Super Steer с шаровым шарниром, обеспечивающим при повороте перемещение мостов в ту же сторону. В результате угол поворота передних колес может достигать 65°.

В колесных тракторах модели Fastrac серии 2000 британской компании JCB Agriculture может устанавливаться система обеспечения высокой маневренности JCB Quadtronic [19], осуществляющая рулевое управление всеми четырьмя колесами. Кроме традиционного управления колесами переднего моста система JCB Quadtronic предоставляет оператору возможность реализовывать следующие режимы рулевого управления (рис. 8):

пропорциональный режим: колеса заднего моста поворачиваются на 1° на каждые 2° поворота колес переднего моста (до 20° для колес заднего моста и до 40° – для переднего моста);

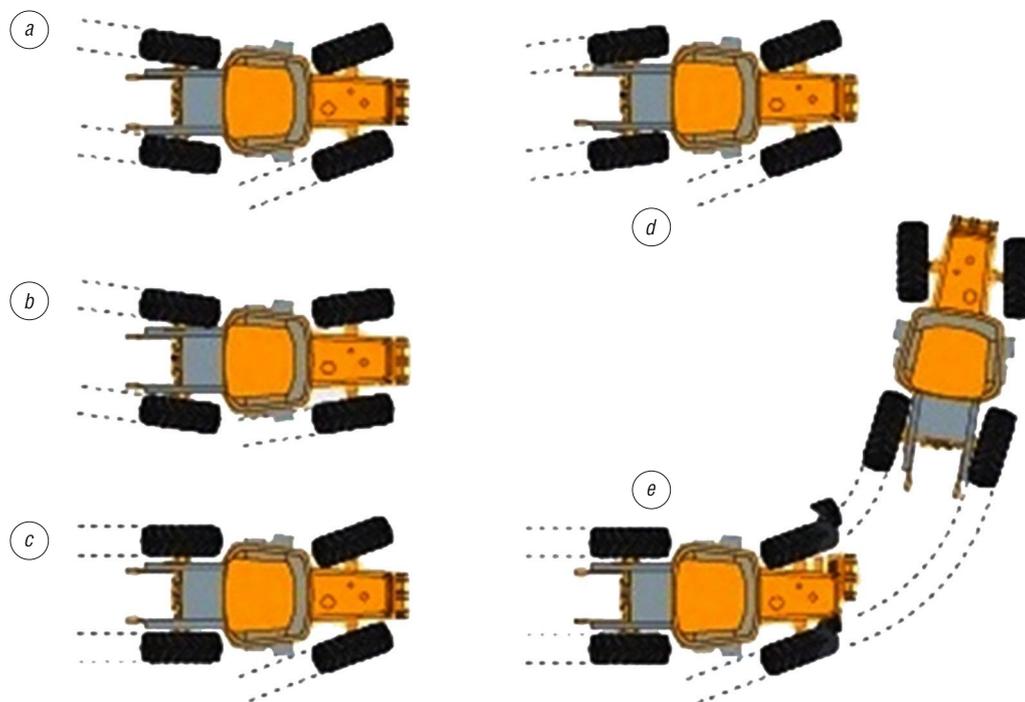


Рис. 8. Режимы рулевого управления модели Fastrac серии 2000 с системой обеспечения высокой маневренности JCB Quadtronic [19]: *a* – пропорциональный режим, *b* – режим движения задних колес в колее передних, *c* – управление двумя колесами, *d* – режим «крабового» хода, *e* – режим задержки

Fig. 8. Steering modes of the tractor Fastrac of series 2000 with the JCB Quadtronic high maneuverability system [19]: *a* – the proportional mode, *b* – the mode of movement of back wheels in a track of forward, *c* – the mode of a two-wheel steering, *d* – the mode of the “crab” movement, *e* – the delay mode

движение задних колес в колее передних (True tracking): колеса переднего и заднего мостов движутся в одной колее, что позволяет минимизировать количество следов на поверхности и повреждение посевов;

задержка: обеспечивает управление всеми четырьмя колесами для достижения малого диаметра поворота и управление двумя колесами переднего моста при движении по междурядью;

режим «крабового» хода (Crab steer): полезен при работе на косогорах, где трактор может скользить на уклонах, а также при опрыскивании вдоль живой изгороди, где этот режим предоставляет возможность удалиться от изгороди без заноса штанги и возможных повреждений.

Система обеспечения высокой маневренности JCB Quadtronic делает модели Fastrac серии 2000 единственными в мире тракторами с полной подвеской и четырьмя управляемыми колесами.

Рабочие тормоза подавляющего большинства энергонасыщенных тракторов, в том числе производства холдинга «МТЗ-ХОЛДИНГ», являются дисковыми, работают в масле, встроены в задний мост и расположены перед конечной передачей. Вследствие увеличения максимальной скорости движения машинно-тракторного агрегата при выполнении транспортных работ в процессе торможения участвуют все ведущие колеса, что обеспечивается подключением ПВМ при торможении или установкой отдельного тормоза в приводе ПВМ. Такие компании, как SAME, LAMBORGINI, HURLIMAN, LANDINI, DEUNZ, устанавливают тормоза в ПВМ. Управление тормозами гидравлическое. Модели тракторов с двигателями свыше 100 л.с., как правило, снабжены гидравлическим сервоусилителем. В ряде случаев на колесах задних и передних мостов применяются тормоза различного типа (дисковые в сочетании с барабанными). Некоторые компании имеют электронную систему включения стояночного тормоза (Electromechanical Parking Brake, EPB), обеспечивающую включение и выключение стояночного тормоза более простым и легким способом.

Стандартная тормозная система Fastrac включает в себя большие внешние дисковые тормоза для каждого колеса и пневматические выходы для тормозов прицепа. Степень безопасности увеличена за счет использования тормозов с гидропневматическим приводом и применения отдельных контуров для переднего и заднего мостов, обеспечивающих большее тормозное усилие на переднем мосту. Модели 8000 и 3000 в стандартной комплектации оснащены тормозами с двойным суппортом, что гарантирует еще большее тормозное усилие при работе с увеличенными нагрузками. Кроме того, модели серии 3000 оснащаются системой Traction Assist, которая улучшает сцепление с дорогой и устойчивость, управляя тормозной системой и двигателем таким образом, чтобы передать мощность колесам с лучшим сцеплением.

Для дальнейшего улучшения устойчивости и управляемости при увеличении скоростей движения до 80 км/ч, а также для выполнения требований законодательства компания JCB адаптировала технологию ABS для грузовых автомобилей, чтобы компенсировать больший диаметр колес тракторов. Для обеспечения уверенности в управляемости при торможении все тракторы Fastrac оснащаются системой ABS с четырьмя датчиками частоты вращения колес и тремя модуляторами, что гарантирует постоянный контроль всех колес и независимое управление задними колесами. Все модели Fastrac с системой АВ оборудуются также 12-вольтовой розеткой питания системы ABS для прицепа, которая работает независимо от системы трактора, устраняя риск перегрузки электропроводки. Эффективная на дороге и при высоких скоростях система Fastrac ABS также обеспечивает улучшенную управляемость и устойчивость при движении по полю, при работе трактора на траве или пожнивных остатках, а также на рыхлых поверхностях, например на грязи или гравии. В моделях серии 3000 функция удержания на уклоне облегчает остановку и начало движения на уклоне.

Отдельным направлением совершенствования сельскохозяйственных машин является автоматизация рабочих процессов и электронизация тракторной техники. Бурное развитие электронно-компонентной базы и информационных технологий привело к интенсивной разработке и внедрению бортовых электронных систем [20]. Дальнейшее распространение получила система блокирования дифференциала. Так, система Terralock™ позволяет автоматически разблокировать дифференциал полноприводных тракторов New Holland для прохождения крутых поворотов с минимальным ущербом для структуры почвы.

Одним из перспективных направлений разработок и развития приводов сельскохозяйственных агрегатов является использование электропривода. Первым производителем, применившим электромоторы для привода вспомогательного оборудования, такого как компрессор кондиционера и вентилятор охлаждения двигателя, явилась компания John Deere с тракторами модели E-Premium. Однако первым колесным трактором сельскохозяйственного назначения, в котором электропривод был использован для привода трансмиссии, стал трактор «Беларус 3023» с двигателем мощностью 300 л.с., получивший серебряную медаль выставки «Agritechnika-2009» (рис. 9).



Рис. 9. Трактор «Беларус 3023» (а) с электромеханической трансмиссией (b)

Fig. 9. Tractor “Belarus 3023” (a) with electromechanical transmission (b)

Точное земледелие. Основным направлением совершенствования технологий растениеводства в настоящее время является точное земледелие. Для реализации технологий точного земледелия сельскохозяйственные тракторы оснащаются системами параллельного вождения, управляемого разворота и активным управлением навесного устройства. Такого рода системы разрабатываются как непосредственно производителями тракторной техники (John Deere, CLAAS), так и независимыми компаниями (TeeJet, Trimble и др.) [2].

Для обеспечения параллельного вождения применяются хорошо известные механические устройства, пенные маркеры, агротехнические и организационные приемы, позволяющие повысить точность вождения агрегатов для внесения удобрений и химических средств защиты растений. Данные устройства устарели и не способны встраиваться в единую систему управления и принятия решений хозяйства.

В последние годы в мировой практике широко внедряются системы параллельного вождения с применением спутниковой навигации, которые хорошо зарекомендовали себя уже и в некоторых хозяйствах Республики Беларусь. Системы параллельного вождения достаточно широко представлены на рынке такими компаниями, как John Deere, Trimble, Müller-Elektronik, TeeJet и рядом других [16].

При управлении техникой, оснащенной системами параллельного вождения с использованием спутниковой навигации, механизатор чувствует себя комфортнее и меньше устает. Он имеет возможность управлять трактором, опираясь не на внешние, в ряде случаев субъективные, ориентиры, а на объективные показания приборов, что повышает качество и скорость работ. Более того, ранним утром при низком солнце или вечером в сумерках трудно рассмотреть маркеры или другие ориентиры, а указатель курса всегда перед глазами. Системы параллельного вождения обеспечивают как прямолинейное движение, так и движение по криволинейным траекториям. Главная идея состоит в том, чтобы свести к минимуму перекрытия и огрехи между соседними проходами.

В общем случае система параллельного вождения состоит из GPS-приемника с внешней антенной, контроллера и указателя курса. Более сложные системы включают в себя механизмы автоматического управления трактором: сервоприводы, гидравлические системы.

При выборе системы параллельного вождения необходимо обратить внимание на точность работы, возможность приема корректирующих сигналов. Если работать с системой в автономном

режиме, то точность параллельного вождения будет невысока и достигать величины 1 м и более. Чтобы ее повысить, применяется дифференциальный сервис, одним из вариантов которого является европейская система EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Services – система широкозонной дифференциальной навигации). Сигнал передается по каналам геостационарных телекоммуникационных спутников и позволяет достигать 15–30-сантиметровой точности прокладки параллельных рядов. Этот сервис бесплатный, а его сигнал может принимать простой GPS-приемник.

Более точная дифференциальная поправка – платная услуга. Существует возможность использовать европейский Omnistar. В зависимости от типа подписки Omnistar обеспечивает несколько уровней точности: VBS и HP/XP. Точность уровня VBS (виртуальная базовая станция) составляет 15–20 см. Этого достаточно для проведения химзащитных работ или внесения удобрений. Уровень HP/XP гарантирует точность 5–10 см. Рекомендуется подписываться на этот сервис тем, кто использует спутниковую навигацию для посева пропашных культур и последующей обработки рядков. Чтобы воспользоваться сервисом VBS и HP/XP, надо иметь GPS-приемник, поддерживающий такие услуги, или модернизировать GPS-приемник начального уровня, добавив к нему специальную антенну и программное обеспечение.

В GPS системах фирмы John Deere используется эксклюзивный дифференцированный сервис, с которым не могут работать GPS-приемники других производителей. Существует две разновидности поправок: SF1 (бесплатный коррекционный сигнал, позволяющий обеспечить точность до 30 см) и SF2 (платный сигнал, аналогичный Omnistar HP/XP).

Самый высокий уровень точности, 1–3 см, достигается с помощью базовых станций, работающих в режиме RTK (Real-Time Kinematics – кинематика в реальном времени). Базовая станция позволяет проводить все виды сельхозработ, в том числе точный высев, локальное внесение удобрений и точную культивацию пропашных культур. С помощью этой системы можно из года в год соблюдать одну и ту же технологическую колею или попадать в одни и те же рядки, чтобы сеять «след в след» несколько лет.

Для управления навесным устройством компанией Trimble разработаны системы TrueGuide и TrueTracker. Система TrueGuide обеспечивает пассивное управление сельскохозяйственной машиной путем корректировки смещения трактора относительно орудия. TrueTracker является системой активного управления сельскохозяйственными орудиями, которая позволяет трактору и рабочему органу двигаться по одной линии посредством смещения линии тяги орудия относительно трактора. Активное управление может осуществляться за счет регулирования положения дисков, дышла, опорных колес или бокового выноса. Система NextSwath компании Trimble предназначена для оптимизации разворота при агрегатировании широкозахватных агрегатов [2].

По данным специалистов Самарской государственной сельскохозяйственной академии, использование только системы параллельного вождения со спутниковой навигацией в одном из хозяйств Самарской области обеспечило увеличение производительности труда на 13–20 %. Система параллельного вождения снизила затраты на удобрения, средства защиты растений и горюче-смазочные материалы до 20 % на гектар. Она позволила устранить 11 % перекрытий и 4 % пропусков. В совокупности это дало экономию денежных средств свыше 180 рос. руб./га. Срок окупаемости системы составил менее полугода.

На основе объединения указанных систем разрабатываются беспилотные технологии сельскохозяйственного производства. Компания Case IH представила бескабинный трактор (рис. 10, а), оснащенный радаром, лидаром, системой видеокамер, GPS и т. д., который способен автономно работать в поле с разнообразным прицепным оборудованием [21]. Бортовая система автоматически учитывает ширину прицепного оборудования и составляет карту наиболее эффективных маршрутов в зависимости от рельефа, имеющихся препятствий и другой техники, работающей на том же поле.

Бескабинный трактор самостоятельно выполняет задание оператора (рис. 10, б). При этом он учитывает погоду, обстановку на поле и множество иных параметров, в том числе может переехать на другое поле в случае, если по каким-то причинам работа на первом поле невозможна. В то же время оператор имеет возможность дистанционно отслеживать и изменять маршруты через рабочий интерфейс своего настольного компьютера или планшета.



Рис. 10. Концептуальная разработка бескабинного трактора компании Case IH (a) в составе машинно-тракторного агрегата (b)

Fig. 10. Conceptual development of the tractor without cabin of Company Case IH (a) in the machine-tractor unit (b)

Заключение. Главными составляющими количественной оценки эффективности использования и производительности тракторов являются показатели их энергонасыщенности и универсальности. Ключевым параметром тракторов сельскохозяйственного назначения является тяговый класс, который определяет прежде всего энергонасыщенность тракторной техники. Универсальность сельскохозяйственных тракторов характеризуется главным образом их максимальными скоростями движения и средними скоростями выполнения транспортных работ.

В основе важнейших направлений развития конструкции сельскохозяйственных тракторов лежит рост производительности. Он достигается в результате как повышения энергонасыщенности, так и универсальности, позволяющей увеличить время непрерывной работы и коэффициент использования трактора.

Повышение энергонасыщенности обеспечивается за счет наращивания мощности силового агрегата колесных тракторов до 600 л.с., а также дополнения модельных рядов гусеничными тракторами нового технического уровня, близко унифицированными с колесными моделями аналогичной мощности. При этом ведущие производители тракторной техники продолжают интенсивные НИОКР по проработке концепции сельскохозяйственного трактора с двигателем мощностью свыше 500 л.с.

Универсальность тракторов повышается развитием их конструкции, обеспечивающим увеличение максимальных и средних скоростей движения. Возрастание транспортных скоростей сельскохозяйственных тракторов до 50–60 км/ч и более достигается совершенствованием ступенчатых коробок передач, разработкой и внедрением бесступенчатых трансмиссий, использованием и улучшением характеристик подвесок ПВМ, кабины и сиденья оператора, применением тормозов колес ПВМ, антиблокировочных и противобуксовочных систем, всеколесного рулевого управления.

Кроме того, большое внимание уделяется улучшению условий труда оператора, в том числе путем совершенствования конструкции, улучшения эргономических и эстетических свойств кабин, автоматизации рабочих процессов за счет разработки и внедрения бортовых электронных систем контроля, диагностики и управления. Для снижения издержек и повышения эффективности сельскохозяйственного производства осуществляется все более широкое применение систем точного земледелия.

Список использованных источников

1. Черноиванов, В. И. Мировые тенденции машинно-технологического обеспечения интеллектуального сельского хозяйства / В. И. Черноиванов, А. А. Ежевский, В. Ф. Федоренко. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2012. – 284 с.
2. Дубовик, Д. А. Основные направления развития автотракторокомбайностроения / Д. А. Дубовик, О. М. Еловый, Л. Ю. Бакалова. – Минск: Объед. ин-т машиностр. Нац. акад. наук Беларуси, 2014. – 176 с. – Деп. в ГУ «БелИСА» 17.07.2014 № Д201411.
3. Fendt Trisix Varío [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mods4fs.ru/publ/sortirovka_po_tipu/tractory/fendt_trisix_vario/3-1-0-19 – Дата доступа: 16.11.2016.
4. Deutz-Fahr Agro XXL [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://avtohistor.ru/obzor-selhoztehniki/deutz-fahr-agro-xxl.html> – Дата доступа: 16.11.2016.

5. Спириданчук, Н. В. Повышение эффективности использования колесного трактора класса 1,4 на транспортных работах в сельскохозяйственном производстве Амурской области: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Н. В. Спириданчук. – Благовещенск, 2010. – 21 с.
6. Дубовик, Д. А. Снижение энергозатрат многоприводных колесных машин путем совершенствования механических приводов ведущих колес: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / Д. А. Дубовик. – Минск, 2011. – 406 с.
7. Выбор типа и параметров современной тракторной трансмиссии / П. А. Амельченко [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2013. – № 8. – С. 14–19.
8. Fendt 900 Vario [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.fendt.com/ru/assets/article/22190/900Vario_G3_03-2015_RU_Web.pdf – Дата доступа 27.02.2017.
9. Дубовик, Д. А. Гидрообъемно-механические трансмиссии мобильных машин. Кинематический и силовой расчет / Д. А. Дубовик, В. И. Прибыльский // Вестн. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 61–72.
10. Самородов, В. Б. Обоснование оптимальных конструктивных параметров бесступенчатой трансмиссии трактора / В. Б. Самородов, А. В. Рогов // Вестн. Нац. техн. ун-та «ХПИ»: сб. науч. тр. Вып.: Автомобиле- и тракторостроение. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2010. – № 1. – С. 8–14.
11. Амельченко, П. А. Гидромеханическая бесступенчатая трансмиссия гусеничной машины / П. А. Амельченко, Д. А. Дубовик, В. А. Коробкин // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Беларус.-Рос. ун-т; И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2015. – С. 174–175.
12. New Holland NH2 – трактор на водородных топливных элементах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dailytechinfo.org/energy/67-new-holland-nh2-tractor-na-vodorodnykh-toplivnykh.html> – Дата доступа: 01.03.2017.
13. Дубовик, Д. А. Повышение проходимости внедорожной машины посредством рационального привода колес управляемых мостов: дис. ... канд. техн. наук / Д. А. Дубовик. – Минск, 2003. – 253 с.
14. NEW HOLLAND T9 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net/nhag/apac/ru/assets/pdf/agriculture-tractors/IR1103NCIS.pdf> – Дата доступа: 01.03.2017.
15. CLAAS. XERION 5000-4000. Поворотная кабина [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.claas.ru/produkte/traktoren/xerion5000-4500-4000-1rc/kabine-komfort/kabine> – Дата доступа: 01.03.2017.
16. Основные тенденции развития современного сельскохозяйственного тракторостроения / П. А. Амельченко [и др.] // Образование, наука и производство в XXI веке: современные тенденции развития: материалы юбилейн. Междунар. конф. / М-во образования Респ. Беларусь, М-во образования и науки Рос. Федерации, Беларус.-Рос. ун-т; И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2016. – С. 157–158.
17. Vysotskii, M. S. Mismatch of Rotational Kinematics of Controllable Truck Wheels / M. S. Vysotskii, D. A. Dubovik, Yu. I. Nikolaev // Rus. Eng. Res. – 2010. – Vol. 30, № 10. – P. 989–994.
18. Дубовик, Д. А. Рассогласование кинематики поворота управляемых колес и эффективность ходовых систем колесных машин / Д. А. Дубовик // Тракторы и сельхозмашины. – 2010. – № 5. – С. 24–27.
19. JCB Трактор [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.jcbblog.ru/jcb_traktor__0_7491.html – Дата доступа: 28.03.2017.
20. Дюжев, А. А. Развитие бортовых электронных и мехатронных систем в Республике Беларусь / А. А. Дюжев, Д. А. Дубовик, В. В. Савченко // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2013. – № 9. – С. 41–46.
21. Беспилотные технологии Case IH могут появиться на обычных тракторах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://agro-max.ru/tehnopark/bespilotnye-technologii-case-ih-mogut-poyavitsya-na-obychnykh-tractorax/> – Дата доступа: 30.08.2017.

References

1. Chernoiyanov V. I., Egevskaia A. A., Fedorenko V. F. *World tendencies of machine-technological support of intellectual agriculture*. Moscow, FSBSI “Rusinformagrotech”, 2012. 284 p. (in Russian).
2. Dubovik D. A., Elovoi O. M., Bakalova L. Ju. *Main directions of development of the automobile, tractor and harvester engineering*. Minsk, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 2014. 176 p. (in Russian).
3. Fendt Trisix Vario. Available at: http://mods4fs.ru/publ/sortirovka_po_tipu/traktory/fendt_trisix_vario/3-1-0-19 (Accessed 16 November 2016) (in Russian).
4. Deutz-Fahr Agro XXL. Available at: <http://avtohistor.ru/obzor-selhoztehniki/deutz-fahr-agro-xxl.html> (Accessed 16 November 2016).
5. Spiridanchuk N. V. *Increase of efficiency of use of wheeled tractor of class 1.4 on transport operations in agricultural production of the Amur region*. Blagoveshchensk, 2010. 21 p. (in Russian).
6. Dubovik D. A. *Decreasing of expenditure of energy of multi-wheel drive vehicles by perfection of mechanical drives of driving wheels*. Minsk, 2011. 406 p. (in Russian).
7. Amel'chenko P. A., Dubovik D. A., Zhukovskii I. N., Klyuchnikov A. V., Zhukovskii A. I. Select the type and parameters of modern tractor transmissions. *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and Agricultural Machinery], 2013, no. 8, pp. 14–19 (in Russian).
8. Fendt 900 Vario. Available at: http://www.fendt.com/ru/assets/article/22190/900Vario_G3_03-2015_RU_Web.pdf (Accessed 27 February 2017) (in Russian).
9. Dubovik D. A., Prybylski V. I. Hydrostatic-mechanical transmissions of mobile machines. Calculation of kinematic and force parameters. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 4, pp. 61–72 (in Russian).

10. Samorodov V. B., Rogov A. V. Substantiation of optimal design parameters of the tractor stepless transmission. *Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universitetata «Khar'kovskii politekhnicheskii institut»: sbornik nauchnykh trudov. Vyp.: Avtomobile- i traktorostroenie* [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv Polytechnic University”: a collection of scientific papers. Issue: Automotive and tractor construction]. Kharkiv, National Technical University “Kharkiv Polytechnic University”, 2010, no. 1, pp. 8–14 (in Russian).

11. Amel'chenko P. A., Doubovik D. A., Korobkin V. A. Hydrostatic-mechanical stepless transmission of the caterpillar vehicle. *Materialy, oborudovanie i resursosberegayushchie tekhnologii. Materialy mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Materials, equipment and resource-saving technologies. Materials of the International Scientific and Technical Conference]. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2015, pp. 174–175 (in Russian).

12. *New Holland NH2 – hydrogen fuel cell tractor*. Available at: <http://www.dailytechinfo.org/energy/67-new-holland-nh2-traktor-na-vodorodnykh-toplivnykh.html> (Accessed 01 March 2017) (in Russian).

13. Doubovik D. A. *Increasing of an passability of an off-road vehicle by efficient drive of the steered axles wheels*. Minsk, 2003. 253 p. (in Russian).

14. *NEW HOLLAND T9*. Available at: <http://d3u1quraki94yp.cloudfront.net/nhag/apac/ru/assets/pdf/agriculture-tractors/IR1103NCIS.pdf> (Accessed 01 March 2017) (in Russian).

15. *CLAAS. XERION 5000-4000. Rotary cab*. Available at: <http://www.claas.ru/produkte/traktoren/xerion5000-4500-4000-lrc/kabine-komfort/kabine> (Accessed 01 March 2017) (in Russian).

16. Amel'chenko P. A., Doubovik D. A., Bakalova L. Yu., Vaschula A. V. Main trends in the development of modern agricultural tractors. *Obrazovanie, nauka i proizvodstvo v XXI veke: sovremennye tendentsii razvitiya. Materialy yubileinoi mezhdunarodnoi konferentsii [Education, Science and Production in the 21st Century: Current Trends of Development. Materials of the Jubilee International Conference]*. Mogilev, Belarusian-Russian University, 2016, pp. 157–158 (in Russian).

17. Vysotskii M. S., Dubovik D. A., Nikolaev Yu. I. Mismatch of Rotational Kinematics of Controllable Truck Wheels. *Russian Engineering Research*, 2010, vol. 30, no. 10, pp. 989–994 (in Russian). DOI: 10.3103/s1068798x10100047

18. Dubovik D. A. Mismatch of the kinematics of turning the steered wheels and the efficiency of the running systems of wheeled vehicles. *Traktory i sel'khoz mashiny = Tractors and Agricultural Machinery*, 2010, no. 5, pp. 24–27 (in Russian).

19. *JCB Tractor*. Available at: http://www.jcbblog.ru/jcb_traktor__0_7491.html (Accessed 28 March 2017) (in Russian).

20. Dyugev A. A., Doubovik D. A., Savchenko V. V. Development of onboard electronic and mechatronic systems in the Republic of Belarus. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie = Mechatronics, Automation, Control*, 2013, no. 9, pp. 41–46 (in Russian).

21. *Unmanned Case IH technologies can appear on conventional tractors*. Available at: <http://agro-max.ru/tehnopark/bespilotnye-tekhnologii-case-ih-mogut-poyavitsya-na-obychnyx-traktorax/> (Accessed 30 August 2017) (in Russian).

Информация об авторах

Амельченко Петр Адамович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь).

Дубовик Дмитрий Александрович – доктор технических наук, доцент, директор НТЦ – заведующий лабораторией, Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ddoubovik@tut.by

Ключников Алексей Владимирович – кандидат технических наук, заместитель генерального конструктора ОАО «МТЗ», МТЗ-ХОЛДИНГ (ул. Долгобродская, 29, 220070, Минск, Республика Беларусь).

Ващук Александр Владимирович – кандидат технических наук, директор, Белорусская машиноиспытательная станция (ул. Мира, 14, 223062, пос. Привольный, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь).

Information about the authors

Petr A. Amelchenko – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Department, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus).

Dmitri A. Doubovik – D. Sc. (Engineering), Assistant Professor, Scientific and Technical Center Director – Head of Laboratory, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ddoubovik@tut.by

Aleksei V. Kluchnikov – Ph. D. (Engineering), Deputy General Designer, MTZ-HOLDING (29, Dolgobrodskaya Str., 220070, Minsk, Republic of Belarus).

Vaschula Aleksandr Vladimirovich – Ph. D. (Engineering), Director, Belarusian Machine Testing Station (14, Mira Str., 223062, township Privolny, Minsk district, Minsk region, Republic of Belarus).

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

УДК 536.46:533.6

Поступила в редакцию 24.11.2017
Received 24.11.2017**Альхусан Халед¹, М.С. Ассад², О.Г. Пенязьков², И.И. Чернухо²**¹*Национальный центр аэрокосмических исследований, KACST, Саудовская Аравия*²*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь***ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕТОНАЦИОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

Аннотация. Предпринята попытка качественно и количественно проанализировать термодинамический цикл детонационного сгорания и сопоставить его с циклами Отто и Брайтона с целью установления степени его термодинамического совершенства. Сравнение термодинамических циклов Отто, Брайтона и детонационного сгорания производилось по эквивалентным циклам Карно, обладающим той же степенью термодинамического совершенства, что и исследуемые циклы. Для определения параметров детонационного цикла использована классическая теория детонации, основанная на законах термодинамики и газодинамики.

Показано, что детонационный цикл по сравнению с циклами Брайтона и Отто имеет большую энтропию в конце подвода тепла и меньшую в конце отвода тепла. Это означает, что он обладает более высокой среднеинтегральной температурой подвода теплоты и более низкой среднеинтегральной температурой отвода теплоты. Так, в диапазоне характерных значений показателя адиабаты k температура в конце процесса сообщения тепла в цикле детонационного сгорания превышает температуру цикла Отто примерно на 7–15 %. Следовательно, детонационный цикл термически более эффективен, поскольку термический КПД цикла увеличивается с расширением температурных границ эквивалентного цикла Карно.

Ключевые слова: термодинамический КПД, детонационный цикл, цикл Отто, цикл Брайтона, среднеинтегральная температура

Для цитирования. Термодинамическая эффективность детонационного двигателя / Альхусан Халед [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 93–100.

Alhussan Khaled¹, M.S. Assad², O.G. Penyazkov², I.I. Chernuho²¹*King Abdulaziz City for Science and Technology, KACST, Saudi Arabia*²*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***THERMODYNAMICAL EFFICIENCY OF A DETONATION ENGINE**

Abstract. An attempt has been made to analyze qualitatively and quantitatively the thermodynamic cycle of detonative combustion and to compare it with the Otto and Brayton cycles in order to establish the degree of its thermodynamic perfection. A comparison of the thermodynamic cycles of Otto, Brayton, and detonation was carried out for equivalent Carnot cycles, which has the same degree of thermodynamic perfection as the investigated cycles. To determine the parameters of the detonation cycle, the classical detonation theory based on the laws of thermodynamics and gasdynamics was used.

It is shown that the detonation cycle in comparison with the cycles of Brayton and Otto has larger entropy at the end of the heat supply and smaller one at the end of the heat removal. That means it has a higher mean-integral temperature of heat input and a lower mean-integral temperature of heat removal. Thus, in the range of characteristic values of the adiabatic index k , the temperature at the end of the heat input process in the detonation cycle exceeds the Otto cycle temperature by about 7–15 %. Consequently, the detonation cycle is thermally more efficient, since the thermal efficiency of the cycle increases with the expansion of the temperature boundaries of the equivalent Carnot cycle.

Keywords: thermodynamic efficiency, detonation cycle, Otto cycle, Brayton cycle, mean-integral temperature

For citation. Alhussan Khaled, Assad M. S., Penyazkov O. G., Chernuho I. I. Thermodynamical efficiency of a detonation engine. *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. 1, pp. 93–100 (in Russian).

Введение. Сжигание топлива в бегущей детонационной волне представляет несомненный практический интерес. В последнее время появились многочисленные публикации по исследованию возможности использования детонации для получения реактивной тяги (например, [1–12]). Обнаружены и первые лабораторные образцы детонационного двигателя для летательных аппаратов. Однако рабочий процесс детонационного двигателя мало изучен с термодинамических позиций. В связи с этим интерес представляет определение термодинамического цикла детонационного сгорания и сопоставление его с известными и хорошо изученными циклами Отто и Брайтона, применяемыми в поршневых и газотурбинных установках. В настоящей работе предпринята попытка качественно и количественно проанализировать термодинамический цикл детонационного сгорания и сопоставить его с циклами Отто и Брайтона. Для определения параметров детонационного цикла будем использовать классическую теорию детонации, основанную на законах термодинамики и газодинамики.

Характерные точки циклов Отто, Брайтона и детонационного сгорания. Термодинамические параметры рабочего тела в характерных точках циклов Отто и Брайтона определялись по известным термодинамическим формулам. Эти циклы имеют с термодинамических позиций ряд известных особенностей, на которых останавливаться здесь не будем. Расчет термодинамического цикла детонационного сгорания производился нами с учетом газодинамических характеристик данного процесса. Характерные точки циклов нумеровали согласно началу и концу соответствующего процесса (рис. 1–3): 1–2 – сжатие; 2–3 – сообщение тепла (сгорание); 3–4 – расширение; 4–1 – отвод тепла.

Для детонационного сжигания справедлива газодинамическая модель в одномерной постановке для ударной волны с выделением энергии, включающая систему уравнений неразрывности, количества движения и сохранения энергии [13, 14]:

$$\frac{u_2}{V_2} = \frac{u_3}{V_3}, \quad (1)$$

$$p_2 + \frac{u_2^2}{V_2} = p_3 + \frac{u_3^2}{V_3}, \quad (2)$$

$$q_1 + E_2 + \frac{u_2^2}{2} = E_3 + \frac{u_3^2}{2}. \quad (3)$$

Из первых двух уравнений нетрудно вывести следующие формулы:

$$u_2^2 = V_2^2 \frac{p_3 - p_2}{V_2 - V_3}, \quad (4)$$

$$u_3^2 = V_3^2 \frac{p_3 - p_2}{V_2 - V_3}. \quad (5)$$

Подставляя выражения (4) и (5) в уравнение (3), получаем уравнение Гюгонио с учетом тепловыделения химической реакции

$$E_3 - E_2 = q_1 + \frac{1}{2}(p_3 - p_2)(V_2 + V_3). \quad (6)$$

Выразим изменение внутренней энергии через изменение температуры $E_3 - E_2 = c_v(T_3 - T_2)$:

$$c_v(T_3 - T_2) - q_1 = \frac{1}{2}(p_3 - p_2)(V_2 + V_3). \quad (7)$$

Зная теплоемкость газа $c_v = \frac{R}{k-1}$ (k – показатель адиабаты) и подведенную теплоту q_1 , можно выразить температуру в конце сообщения тепла T_3 как функцию степени повышения давления $\delta = \frac{p_3}{p_2}$

$$T_3 = \frac{q_1 + \left[c_v + \frac{R}{2} \left(\frac{p_3}{p_2} - 1 \right) \right] T_2}{c_v + \frac{R}{2} \left(\frac{p_2}{p_3} - 1 \right)} \quad (8)$$

или как функцию изменения скорости волны $\theta = \frac{u_3}{u_2}$

$$T_3 = \frac{q_1 + c_v T_2}{c_v - \frac{kRM_3^2}{2} \left(\frac{1}{\theta^2} - 1 \right)}. \quad (9)$$

Формула (9) получена из (3) путем выноса u_3^2 в слог $\frac{u_2^2 - u_3^2}{2}$ за скобки и выражения скорости волны в точке 3 как $u_3^2 = a_3^2 M_3^2$ (a_3, M_3 – соответственно скорость звука и число Маха в характерной точке 3" цикла детонационного сгорания), а скорости звука – как $a_3^2 = kRT_3$.

Подведенная в процессе 2–3 теплота q_1 (кДж/кмоль) определяется по известным из термодинамики формулам с учетом низшей теплоты сгорания топлива H_u и коэффициента избытка горючего ϕ :

$$\text{для газообразных топлив } q_1 = \frac{H_u}{1 + \frac{r_o(1+\beta)}{\phi}},$$

$$\text{для жидких топлив } q_1 = \frac{H_u}{\frac{1}{\mu_f} + \frac{r_o(1+\beta)}{\phi}},$$

где r_o – количество окислителя (суммарного кислорода), теоретически необходимое для полного сгорания единицы объема газообразного или единицы массы жидкого топлива, вычисляемое из стехиометрической реакции окисления $C_n H_m + r_o O_2 + r_o \beta N_2 \rightleftharpoons n CO_2 + 0,5m H_2O$ (например, для гептана $r_o = 2,464$ л/г топлива, или 0,11 моль/г топлива); β – отношение азота к кислороду в горючей смеси; μ_f – молярная масса жидкого топлива (например, для гептана $\mu_{C_7H_{16}} = 100$ г/моль).

Термодинамический КДП циклов. Термодинамический анализ выполнялся при одинаковых величинах начальных температуры T_1 и давления p_1 , степени сжатия, теплоты сгорания (теплотворной способности) горючей смеси путем сопоставления значений параметров в характерных точках рассматриваемых циклов. При этом принято, что процессы подвода и отвода теплоты являются политропными, то есть протекают при постоянной теплоемкости; процессы сжатия и расширения адиабатные. Такой подход во многом упрощает анализ и позволяет судить о преимуществах одних циклов перед другими.

Сравнение термодинамических циклов Отто, Брайтона и детонационного сгорания производили по эквивалентным циклам Карно, обладающим той же степенью термодинамического совершенства, что и исследуемые циклы. Дело в том, что в процессах подвода и отвода теплоты с переменной температурой рабочего тела термический КПД не связан непосредственно с предельными температурами этих процессов, а определяется величинами среднеинтегральных (эквивалентных) температур $T_{\text{int}(2-3)}$ и $T_{\text{int}(4-1)}$, которые являются предельными температурами эквивалентного цикла Карно для рассматриваемого цикла.

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{T_{\text{int}(2-3)} - T_{\text{int}(4-1)}}{T_{\text{int}(2-3)}}. \quad (10)$$

Для определения верхней $T_{\text{int}(2-3)}$ и нижней $T_{\text{int}(4-1)}$ эквивалентного цикла Карно температуры в процессах сообщения и отнятия тепла рассматриваемых циклов подлежали планиметрированию [15, 16]:

$$T_{\text{int}(2-3)} = \frac{q_1}{\Delta s_{2-3}} = \frac{\int_{s_2}^{s_3} T ds}{s_3 - s_2}, \quad (11)$$

$$T_{\text{int}(4-1)} = \frac{q_2}{\Delta s_{4-1}} = \frac{\int_{s_4}^{s_1} T ds}{s_4 - s_1}. \quad (12)$$

В случае постоянной теплоемкости в процессах подвода 2–3 и отвода 4–1 теплоты среднеинтегральные температуры будут равны:

$$T_{\text{int}(2-3)} = \frac{\int_{s_2}^{s_3} c dT}{s_3 - s_2} = \frac{c(T_3 - T_2)}{s_3 - s_2} = \frac{T_3 - T_2}{\ln \frac{T_3}{T_2}}, \quad (13)$$

$$T_{\text{int}(4-1)} = \frac{\int_{s_4}^{s_1} c dT}{s_4 - s_1} = \frac{c(T_4 - T_1)}{s_4 - s_1} = \frac{T_4 - T_1}{\ln \frac{T_4}{T_1}}. \quad (14)$$

На рис. 1 изображена энтропийная диаграмма цикла детонационного сгорания 1–2–3''–4''–1 в сравнении с циклом Брайтона 1–2–3'–4'–1, на рис. 2 – в сравнении с циклом Отто 1–2–3–4–1; там же показаны эквивалентные циклы Карно для этих циклов, изотермы которых соответствуют среднеинтегральным температурам в процессах сообщения и отнятия тепла. Численные значения максимальной температуры и давления сравниваемых циклов отражены в таблице, в которой также приведены значения термического КПД и среднего индикаторного давления, чей анализ описывается далее в настоящей статье.

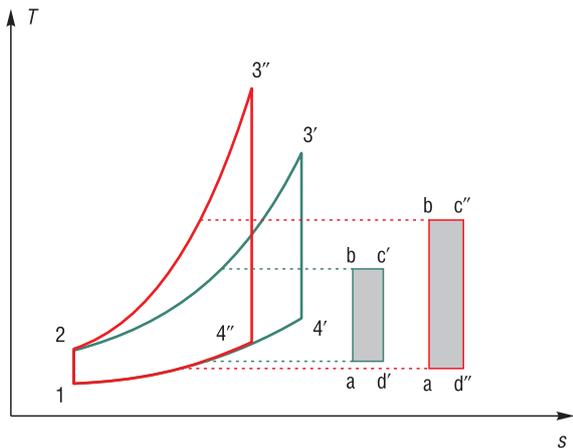


Рис. 1. Сравнительная энтропийная диаграмма циклов: (1–2–3'–4') – прямой цикл Брайтона; (1–2–3''–4'') – прямой цикл детонационного сгорания; (a–b–c'–d') – эквивалентный цикл Карно для цикла Брайтона; (a–b–c''–d'') – эквивалентный цикл Карно для цикла детонационного сгорания

Fig. 1. Comparative entropy diagram of the cycles: (1–2–3'–4') – direct Brayton cycle; (1–2–3''–4'') – direct detonation cycle; (a–b–c'–d') – the Carnot cycle equivalent to the Brayton cycle; (a–b–c''–d'') – the Carnot cycle equivalent to the detonation cycle

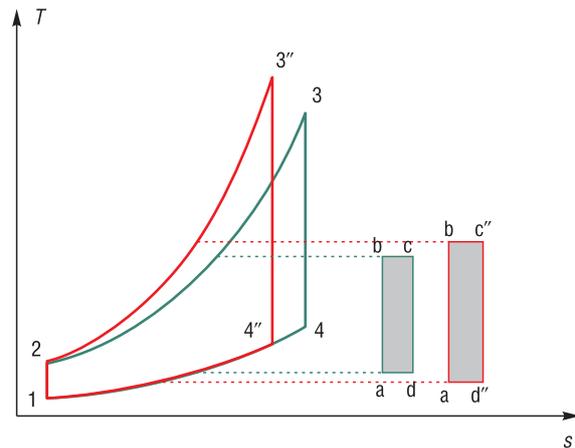


Рис. 2. Сравнительная энтропийная диаграмма циклов: (1–2–3–4) – прямой цикл Отто; (1–2–3''–4'') – прямой цикл детонационного сгорания; (a–b–c–d) – эквивалентный цикл Карно для цикла Отто; (a–b–c''–d'') – эквивалентный цикл Карно для цикла детонационного сгорания

Fig. 2. Comparative entropy diagram of the cycles: (1–2–3–4) – direct Otto cycle; (1–2–3''–4'') – direct detonation cycle; (a–b–c–d) – the Carnot cycle equivalent to the Otto cycle; (a–b–c''–d'') – the Carnot cycle equivalent to the detonation cycle

Сравнение циклов
Comparison of cycles

Цикл	T_{\max} , К	p_{\max} , атм	η_l	p_1 , атм
Отто	2971	60,83	0,40	14,58
Брайтона	2534	11,23	0,47	3,54
Детонационного сгорания	3289	121,67	0,57	6,00

Предельные температура и давление T_2 и p_2 компрессорной линии 1–2 для трех циклов при одной и той же степени сжатия одинаковые. Поэтому сравнению подлежали характерные точки только процессов подвода, расширения и отвода теплоты.

Термический КПД цикла, согласно уравнению (10), увеличивается с расширением температурных границ эквивалентного цикла Карно. Это означает, что если цикл детонационного сгорания обладает более высоким термическим КПД по сравнению с циклами Брайтона и Отто, то такое возможно при более высокой среднеинтегральной температуре подвода теплоты и/или более низкой среднеинтегральной температуре отвода теплоты. Докажем это.

Сравнение с циклом Брайтона. Вследствие равенства подведенной теплоты в обоих циклах, то есть $q_1^D = q_1^{\text{Bрайтон}}$ и выражая изменение внутренней энергии через изменение температуры $E_3 - E_2 = c_v(T_3 - T_2)$, получаем

$$c_v(T_3'' - T_2) = c_p(T_3' - T_2).$$

Так как всегда $c_p > c_v$, то имеет место неравенство

$$T_3'' > T_3'.$$

Этот вывод подтверждается как расчетом, так и экспериментом. Следовательно, согласно выражению (13), среднеинтегральная температура процесса сообщения тепла 2–3'' в цикле детонационного сгорания выше, чем среднеинтегральная температура процесса сообщения тепла 2–3' в цикле Брайтона.

Для того чтобы среднеинтегральная температура отвода тепла в цикле детонационного сгорания была ниже, чем в цикле Брайтона, значение энтропии в точке 3'' должно быть меньше ее значения в точке 3'.

Из выражения (14), с учетом последнего вывода, следует, что среднеинтегральная температура в процессе отвода тепла 4''–1 в цикле детонационного сгорания ниже, чем в процессе отвода тепла 4'–1 в цикле Брайтона. Это наглядно иллюстрируется энтропийной диаграммой на рис. 1.

Сравнение с циклом Отто. Докажем теперь, что термический КПД детонационного сгорания выше такового для цикла Отто (см. рис. 2). Из теории детонации известно [13], что температура детонационного сжигания приблизительно в $\frac{2k}{k+1}$ раз выше температуры сгорания в замкнутом объеме. Поскольку подвод теплоты и сгорание в цикле Отто происходят при $v = \text{const}$, то имеет место соотношение

$$T_3'' \approx \frac{2k}{k+1} T_3.$$

Анализ показывает, что в диапазоне характерных значений показателя адиабаты k температура в точке 3'' в конце процесса сообщения тепла в цикле детонационного сгорания превышает температуру в точке 3 цикла Отто примерно на 7–15 %. Следовательно, среднеинтегральная температура подвода тепла в цикле детонационного сгорания выше, чем среднеинтегральная температура подвода тепла в цикле Отто. По аналогии с выкладками при сравнении циклов детонационного сгорания и Брайтона можно доказать, что точка 3'' расположена на T - s диаграмме левее точки 3 (см. рис. 2), то есть имеет место неравенство

$$s_3'' < s_3.$$

Следовательно, среднеинтегральная температура при отводе тепла в цикле детонационного сгорания будет ниже, чем в цикле Отто.

Таким образом, из сопоставления эквивалентных циклов Карно можно заключить, что при одинаковых степени сжатия и сообщенной теплоте цикл детонационного сгорания обладает более высоким термическим КПД, чем циклы Брайтона и Отто.

Приведенное теоретическое сопоставление рассматриваемых циклов подтверждается численным расчетом, результаты которого проиллюстрированы на рис. 3. Сравнение проведено для стехиометрической смеси ($f = 1$) гептана с воздухом при $T_1 = 293$ К, $p_1 = 0,1$ МПа и $\varepsilon = 6$ с использованием термодинамических зависимостей для соответствующего цикла, а для цикла детонационного сгорания – с привлечением уравнений газовой динамики, приведенных ранее в данной работе. Из рис. 3 следует, что термический КПД цикла детонационного сгорания выше, чем η_t цикл Брайтона в 1,32 раза и чем цикл Отто в 1,38 раза. Сказанное свидетельствует о преимуществе детонации, благодаря которой диапазон предельных температур эквивалентного цикла Карно расширяется: верхняя среднеинтегральная температура возрастает на 7 % по сравнению с циклом Отто и на 18 % по сравнению с циклом Брайтона; нижняя среднеинтегральная температура становится ниже на 36 и 21 % соответственно.

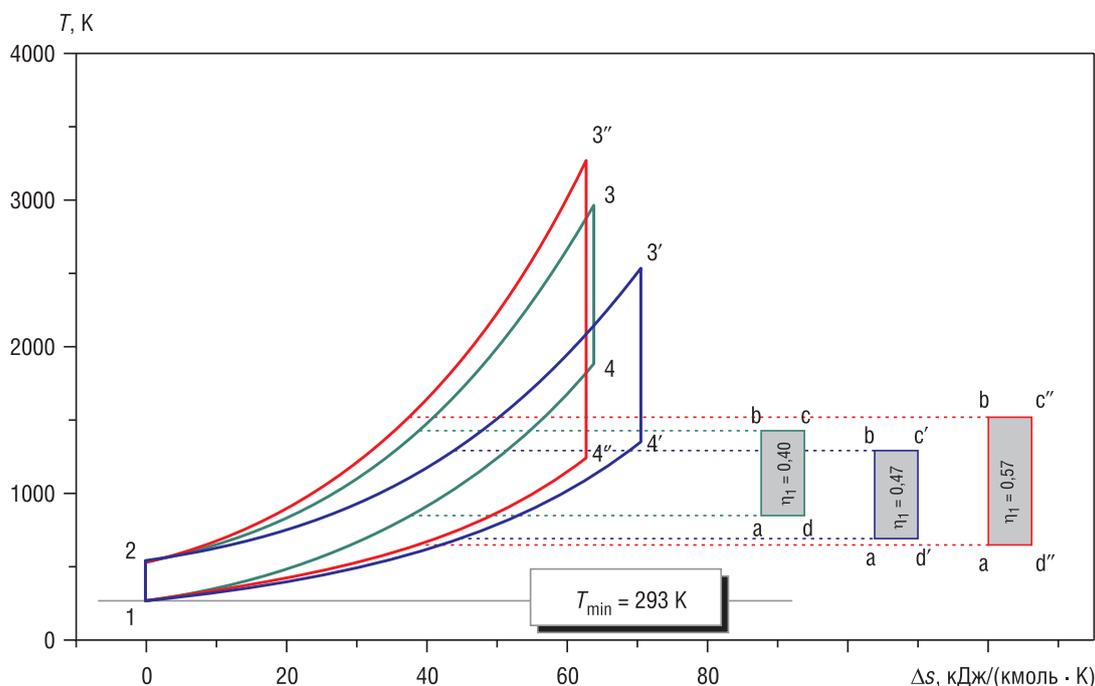


Рис. 3. Сравнительная энтропийная диаграмма циклов: (1–2–3–4–1) – прямой цикл Отто; (1–2–3'–4'–1) – прямой цикл Брайтона; (1–2–3''–4''–1) – прямой цикл детонационного сгорания; (a–b–c–d–a) – эквивалентный цикл Карно для цикла Отто; (a–b–c'–d'–a) – эквивалентный цикл Карно для цикла Брайтона; (a–b–c''–d''–a) – эквивалентный цикл Карно для цикла детонационного сгорания

Fig. 3. The entropy diagram of the cycles: (1–2–3–4) – direct Otto cycle; (a–b–c–d) – the Carnot cycle, equivalent to the Otto cycle; (1–2–3'–4') – direct Brayton cycle; (a–b–c'–d') – the Carnot cycle, equivalent to the Brayton cycle; (1–2–3''–4'') – direct detonation cycle; (a–b–c''–d'') – the Carnot cycle, equivalent to the detonation cycle

Закключение. На основании выполненного термодинамического сравнения тепловые двигатели, использующие циклы Отто, Брайтона и детонационного сгорания, термодинамически можно расположить в следующем порядке:

по величине термодинамического КПД: 1) цикл детонационного сгорания; 2) цикл Брайтона; 3) цикл Отто;

по максимальным значениям температуры и давления: 1) цикл детонационного сгорания; 2) цикл Отто; 3) цикл Брайтона;

по величине индикаторного давления: 1) цикл Отто; 2) цикл детонационного сгорания; 3) цикл Брайтона.

Список использованных источников

1. Heterogeneous catalytic decomposition of JP-10: for use in a pulsed engine / C. E. Galligan [et al.] // *Хим. физика*. – 2005. – Т. 24, №7. – С. 91–96.
2. Басевич, В. Я. Условия существования стационарной гетерогенной детонации / В. Я. Басевич, С. М. Фролов, В. С. Посвянский // *Хим. физика*. – 2005. – Т. 24, №7. – С. 58–68.
3. Переход горения в детонацию воздушных смесей бинарных горючих в канале с препятствиями / С. П. Медведев [и др.] // *Хим. физика*. – 2010. – Т. 29, №1. – С. 58–63.
4. Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety: State-of-the Art Report by a Group of Experts. NEA/CSNI/R(2000)7 [Electronic resource] / W. Breitung [et al.]; Nuclear Energy Agency. August 2000. – Mode of access: <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2000/csni-r2000-7.pdf> – Date of access: 20.10.2017.
5. Переход горения в детонацию в турбулентном потоке в пульсирующем детонационном двигателе / Д. И. Бакланов [и др.] // *Хим. физика*. – 2005. – Т. 24, №7. – С. 11–18.
6. Фролов, С. М. Иницирование детонации в распылах жидкого топлива / С. М. Фролов, В. С. Аксенов, В. Я. Басевич // *Хим. физика*. – 2005. – Т. 24, №7. – С. 69–77.
7. Initiation of confined detonation by electric discharges / S. M. Frolov [et al.] // *Confined Detonations and Pulse Detonation Engines* / ed. by G. D. Roy [et al.]. – М.: Torus Press, 2003. – P. 157–174.
8. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective / G. D. Roy [et al.] // *Progress in Energy and Combustion Sciences*. – 2004. – Vol. 30, Iss. 6. – P. 545–672.
9. Формирование детонации в импульсной камере сгорания с пористым препятствием / Х. Альхусан [и др.] // *Инженер.-физ. журн.* – 2012. – Т. 85, №5. – С. 968–973.
10. Detonation Acceleration Research in Pulsed Combustor / M. S. Assad [et al.] // *Proc. of 24th Int. Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. 2013, July 28 – Aug. 02. – Taipei, Taiwan, 2013. – P. 131.
11. Assad, M. S. Detonation in Heptane / Oxygen / Air Mixtures in a Pulsed Combustor / M. S. Assad, O. G. Penyazkov // *Proc. of 2013 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics (2013 IASPEP)*, Sept. 24–27. – Chengdu, Sichuan Province, China, 2013. – P. 284–286.
12. Влияние турбулентного течения на переход горения в детонацию в смесях водорода с кислородом и воздухом в импульсной камере сгорания / М. С. Ассад [и др.] // *Хим. физика*. – 2014. – Т. 33, №3 – С. 62–67.
13. Зельдович, Я. Б. Теория детонации / Я. Б. Зельдович, А. С. Компанец. – М.: Гостехиздат, 1955. – 268 с.
14. Войцеховский, Б. В. Структура фронта детонации в газах / Б. В. Войцеховский, В. В. Митрофанов, М. Е. Топчян. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1963. – 168 с.
15. Мартыновский, В. С. Термодинамические характеристики циклов тепловых и холодильных машин / В. С. Мартыновский. – М.: Госэнергоиздат, 1952. – 216 с.
16. Андрущенко, А. И. Основы термодинамики циклов теплоэнергетических установок / А. И. Андрущенко. – М.: Высш. шк., 1968. – 288 с.

References

1. Galligan C. E., Dubois C., Stowe R., Kaliaguine S., Niaki H. Heterogeneous catalytic decomposition of JP-10: for use in a pulsed engine. *Himicheskaya fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B.*, 2005, vol. 24, no. 7, pp. 91–96.
2. Basevich V. Ya., Frolov S. M., Posvyansky V. S. Conditions for the existence of a stationary heterogeneous detonation. *Himicheskaya fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B.*, 2005, vol. 24, no. 7, pp. 58–68 (in Russian).
3. Medvedev S. P., Polenov A. N., Khomik S. V., Gelfand B. E. Deflagration-to-detonation transition in air-binary fuel mixtures in an obstacle-laden channel. *Russian Journal of Physical Chemistry B.*, 2010, vol. 4, no. 1, pp. 70–74. DOI: 10.1134/s1990793110010112
4. Breitung W., Chan C., Dorofeev S., Eder A., Gelfand B., Heitsch M., Klein R., Malliakos A., Shepherd E., Studer E., Thibault P. Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition in Nuclear Safety. OECD State of the Art Report by a Group of Experts. NEA / CSNI / R (2000) 7. 2000. Available at: <https://www.oecd-nea.org/nsd/docs/2000/csni-r2000-7.pdf> (Accessed 20 October 2017).
5. Baklanov D. I., Gvozdeva L. G., Kaltaev A., Shcherbak N. B. Transition of combustion to detonation in a turbulent flow in a pulsating detonation engine. *Himicheskaya fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B.*, 2005, vol. 24, no. 7, pp. 11–18 (in Russian).
6. Frolov S. M., Aksenov V. S., Basevich V. Ya. The initiation of detonation in the spraying of liquid fuels. *Himicheskaya fizika = Russian Journal of Physical Chemistry B.*, 2005, vol. 24, no. 7, pp. 69–77 (in Russian).
7. Frolov S. M., Basevich V. Ya., Aksenov V. S., Polikhov S. A. Initiation of confined detonation by electric discharges. Roy G. D., Frolov S. M., Santoro R., Tsyganov S. A. (eds.) *Confined Detonations and Pulse Detonation Engines*. Moscow, Torus Press, 2003, pp. 157–174.
8. Roy G. D., Frolov S. M., Borisov A. A., Netzer D. W. Pulse detonation propulsion: challenges, current status, and future perspective. *Progress in Energy and Combustion Sciences*, 2004, vol. 30, issue 6, pp. 545–672. DOI: 10.1016/j.pecc.2004.05.001
9. Alhussan Kh., Assad M. S., Penyazkov O. G., Sevruk K. L. Formation of detonation in a pulsed combustion chamber with a porous obstacle. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2012. vol. 85, no. 5, pp. 1052–1057. DOI: 10.1007/s10891-012-0746-2

10. Assad M. S., Penyazkov O. G., Sevrouk K. L., Yaumenchycou M. L. Detonation Acceleration Research in Pulsed Combustor. *Proceedings of 24th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems*. Taipei, 2013, p. 131.

11. Assad M. S., Penyazkov O. G. Detonation in Heptane / Oxygen / Air Mixtures in a Pulsed Combustor. *Proceedings of 2013 International Autumn Seminar on Propellants, Explosives and Pyrotechnics*. Chengdu, Sichuan Province, 2013, pp. 284–286.

12. Assad M. S., Al'khusan Kh., Penyaz'kov O. G., Sevruk K. L. Influence of turbulent flow on the transition of combustion to detonation in mixtures of hydrogen with oxygen and air in a pulsed combustion chamber. *Russian Journal of Physical Chemistry B.*, 2014, vol. 8, no. 2, pp. 181–185. DOI: 10.1134/s199079311402002x

13. Zeldovich Ya. B., Kompaneets A. S. *Detonation Theory*. Moscow, Gosteizdat Publ., 1955. 268 p. (in Russian).

14. Voitsekховsky B. V., Mitrofanov V. V., Topchiyan M. E. *Structure of the Detonation Front in Gases*. Novosibirsk, Press of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences, 1963. 168 p. (in Russian).

15. Martynovsky V. S. *Thermodynamic Characteristics of the Cycles of Thermal and Refrigerating Machines*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1952. 216 p. (in Russian).

16. Andryushchenko A. I. *Principles of the Thermodynamic Cycles of Thermal Power Engineering Plants*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1968. 288 p. (in Russian).

Информация об авторах

Альхусан Халед – кандидат физико-математических наук, директор, Институт аэрокосмических технологий, Научно-технологический центр им. Короля Абдулазиза (KACST) (Эр-Рияд, Саудовская Аравия). E-mail: kalhussan@kacst.edu.sa

Ассад Мохаммад Сабетович – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: assad@hmti.ac.by

Пеньязков Олег Глебович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, директор, Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: penyaz@dnpiitmo.by

Чернухо Иван Иванович – аспирант, младший научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chernuho.ivan@mail.ru

Information about the authors

Alhussan Khaled – Ph. D. (Physics and Mathematics), Director of the National Center for Aeronautical Technology, KACST, Saudi Arabia, National Center for Aeronautical Technology (KACST) (Ryadh, Saudi Arabia). E-mail: kalhussan@kacst.edu.sa

Mohamad S. Assad – D. Sc. (Engineering), Leading Researcher, A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: assad@hmti.ac.by

Oleg G. Penyazkov – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Physics and Mathematics), Director of the A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: penyaz@dnpiitmo.by

Ivan I. Chernuho – Ph. Student, Junior Researcher, A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (15, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: chernuho.ivan@mail.ru

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 621.311

Поступила в редакцию 27.07.2017
Received 27.07.2017

А. С. Мельников, Б. И. Попов

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГРАФИКА ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ НАГРУЗКИ ПРИ ДОЛГОСРОЧНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Аннотация. Описана методология прогнозирования основных характеристик графика продолжительности нагрузки: коэффициента неравномерности, коэффициента заполнения и величины электропотребления. Характеристики необходимы для прогнозирования графиков продолжительности электрической нагрузки на длительных временных периодах. На основе обширной статистической информации о почасовых нагрузках Белорусской энергосистемы за период с 1997 по 2014 г. найдены исторические тренды изменения характеристик. С использованием полученных трендов и ряда предположений о тенденциях их долгосрочного изменения рассчитаны краевые сценарии изменения характеристик на продолжительном промежутке времени. Каждый краевой сценарий образован путем комбинации основных характеристик графика продолжительности нагрузки. Сценарный подход и ранее разработанный метод оперативного восстановления графиков продолжительности электрической нагрузки на основе ее основных характеристик дают возможность получить возможные граничные формы этих графиков для прогнозируемого временного периода. Особенностью подхода предлагаемой методологии является прогнозирование таких характеристик, как объемы электропотребления и форма графиков продолжительности электрической нагрузки в определенных диапазонах. Ширина диапазонов обоснована анализом ретроспективной информации и может быть скорректирована с учетом вновь поступающей информации. Применение предлагаемого подхода целесообразно в оптимизационных программах планирования энергосистем. Полученные численные результаты будут использованы для оптимизации структуры Белорусской энергосистемы.

Ключевые слова: график продолжительности нагрузки, прогнозирование, тренд, коэффициент заполнения, коэффициент неравномерности, пиковая нагрузка, объем электропотребления

Для цитирования. Мельников, А. С. Прогнозирование основных характеристик графика продолжительности нагрузки при долгосрочной оптимизации энергосистем / А. С. Мельников, Б. И. Попов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 101–110.

A. S. Melnikov, B. I. Popov

Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

FORECASTING THE LOAD DURATION CURVES FOR LONG-TERM OPTIMIZATION OF ENERGY SYSTEMS

Abstract. A methodology of forecasting the main characteristics of load duration curves is described: the coefficient of unevenness, the load factor and the magnitude of power consumption. The characteristics are necessary for predicting of the electrical load duration curves over long time periods. Based on extensive statistical information on the hourly loads of the Belarusian energy system for the period from 1997 to 2014, historical trends of characteristics change were found. Each edge scenario was formed by combining the main characteristics of the load duration curve. Scenario approach and the previously developed method of operative restoration of the curves of the duration of the electrical load on the basis of its main characteristics make it possible to obtain possible boundary forms of these curves for a number of future years. A feature of the approach of the proposed methodology is that such characteristics as the amount of power consumption, as well as the shape of the curves of the duration of electric load are predicted in a certain ranges. The width of the ranges is justified by the analysis of the retrospective information and can be adjusted taking into account the newly received information. The proposed approach can be used in optimization programs of energy system planning. The obtained numerical results can be used to optimize the structure of the Belarusian energy system.

Keywords: load duration curve, forecasting, trend, load factor, coefficient of unevenness, peak load, volume of power consumption

For citation. Melnikov A. S., Popov B. I. Forecasting the load duration curves for long-term optimization of energy systems. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 101–110 (in Russian).

Введение. Известно, что при создании долгосрочной стратегии развития современных энергетических систем используется специальное программное обеспечение (ПО). Для расчетов с помощью подобного ПО необходимы исходные данные, выражающие будущий спрос электроэнергии, который будет покрываться искомой оптимальной структурой энергоблоков различного типа. В частности, модель оптимизации WASP-IV для осуществления расчетов требует исходную информацию о спросе электроэнергии в виде графиков продолжительности и пиковых значений нагрузки [1]. Подобный расчет предполагает наличие большого количества вероятных будущих форм графиков продолжительности нагрузки, в том числе для длительных периодов времени. Стоит отметить существование модели MAED [2], предназначенной, помимо прочего, для построения будущих графиков продолжительности нагрузки. Однако применение данной модели затруднительно из-за необходимости использования обширных исходных данных экономического характера, что не всегда осуществимо.

Долгосрочное прогнозирование вероятных сценариев будущих графиков продолжительности нагрузки целесообразно провести на основании ретроспективных данных о почасовых нагрузках, содержащих в неявном виде тенденции, характеризующие развитие изучаемой энергосистемы.

В данной работе за основу для проведения прогнозирования берутся ретроспективные данные о почасовых нагрузках Белорусской энергосистемы в 1997–2014 гг. и метод восстановления графика продолжительности нагрузки, описанный в [3]. Почасовые нагрузки системы являются доступной информацией и могут быть взяты с сайта Республиканского унитарного предприятия электроэнергетики «Объединенное диспетчерское управление» (www.odu.by) в разделе «Оперативные данные о производственной деятельности ОЭС Беларуси».

Цель настоящей работы состоит в долгосрочном прогнозировании основных параметров графиков продолжительностей электрических нагрузок на основании данных об изменениях почасовых нагрузок в Белорусской энергосистеме за период с 1997 по 2014 г.

Постановка и решение задачи. В соответствии с общепринятыми определениями под коэффициентом заполнения графиков электрической нагрузки будем понимать отношение средней нагрузки к максимальной, под коэффициентом неравномерности – отношение минимальной нагрузки к максимальной.

На рис. 1 приведены годовые графики продолжительности электрической нагрузки энергосистемы Республики Беларусь в 2000, 2006, 2010 и 2014 гг. в относительном виде. На рисунке

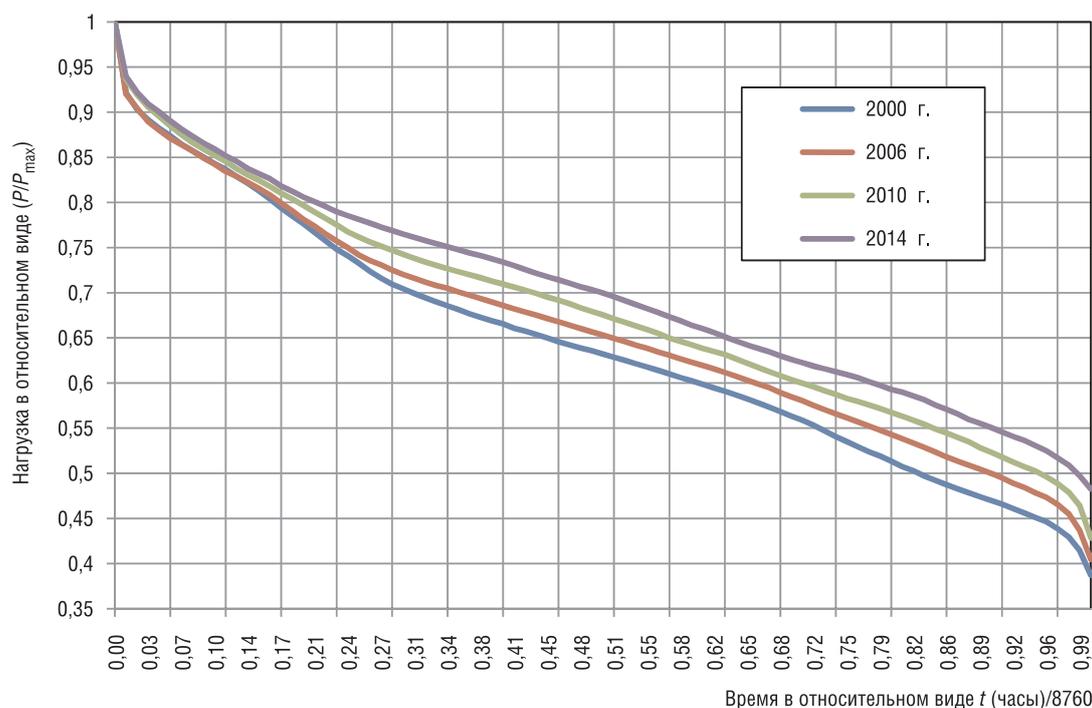


Рис. 1. Графики продолжительности электрической нагрузки

Fig. 1. Load duration curves

отчетливо видна тенденция увеличения коэффициентов заполнения графиков электрической нагрузки, проявляющаяся в подъеме графиков от 2000 к 2014 г.

Фактические характеристики – коэффициенты заполнения и неравномерности графиков электрической нагрузки – показаны на рис. 2.

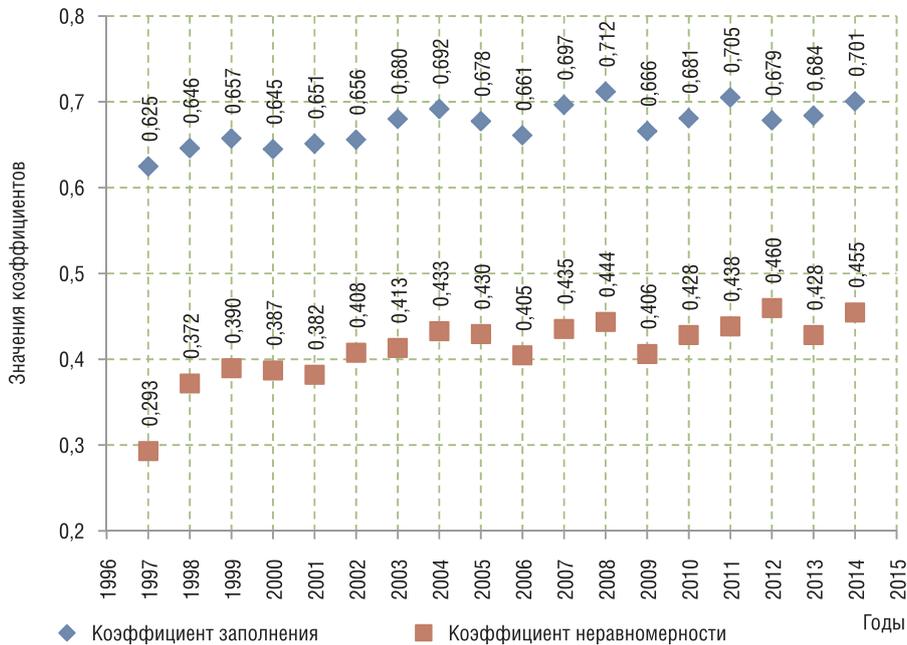


Рис. 2. Коэффициенты заполнения и неравномерности графиков электрической нагрузки

Fig. 2. Load factors and coefficients of unevenness for electric load graphs

Для построения прогнозов коэффициентов заполнения и неравномерности предположим следующее:

тренд изменения коэффициентов можно построить по их фактическим значениям методом наименьших квадратов и продолжить на необходимый временной период;

значения коэффициентов являются случайной величиной, распределенной по нормальному закону относительно построенного тренда, основанием для такого предположения является подверженность работы электроэнергетической системы влиянию многочисленных факторов;

в соответствии с характером нормального распределения диапазон изменения коэффициентов, в который с большой вероятностью (0,997) укладываются их значения, определим как

$$K_{тр} \pm \delta_{тр}, \tag{1}$$

где $K_{тр}$ – значение коэффициента, полученное по его тренду; $\delta_{тр}$ – максимальное относительное отклонение фактического значения от величины, полученной по тренду, определенное из фактических данных.

Тогда значения коэффициента в году прогнозируемого периода попадут в диапазон

$$K_i = K_{три} \pm \delta_{тр} K_{три}. \tag{2}$$

На рис. 3 сплошной линией показан тренд, построенный указанным методом для коэффициента заполнения графика нагрузки. Логарифмическая функция, вид которой также приведен на рис. 3, представляется наиболее подходящей для построения тренда, поскольку соответствует как тенденции возрастания коэффициента, так и асимптотическому характеру его поведения в зависимости от времени. По оси ординат диаграммы отложены порядковые номера годов, причем за 1 принят 1997 г. Показаны также рассчитанные описанным в настоящей статье способом минимальные и максимальные значения коэффициента заполнения с их аналитическим представлением логарифмической функцией, которые легко получить, пользуясь, например, стандартной процедурой таблиц Excel.

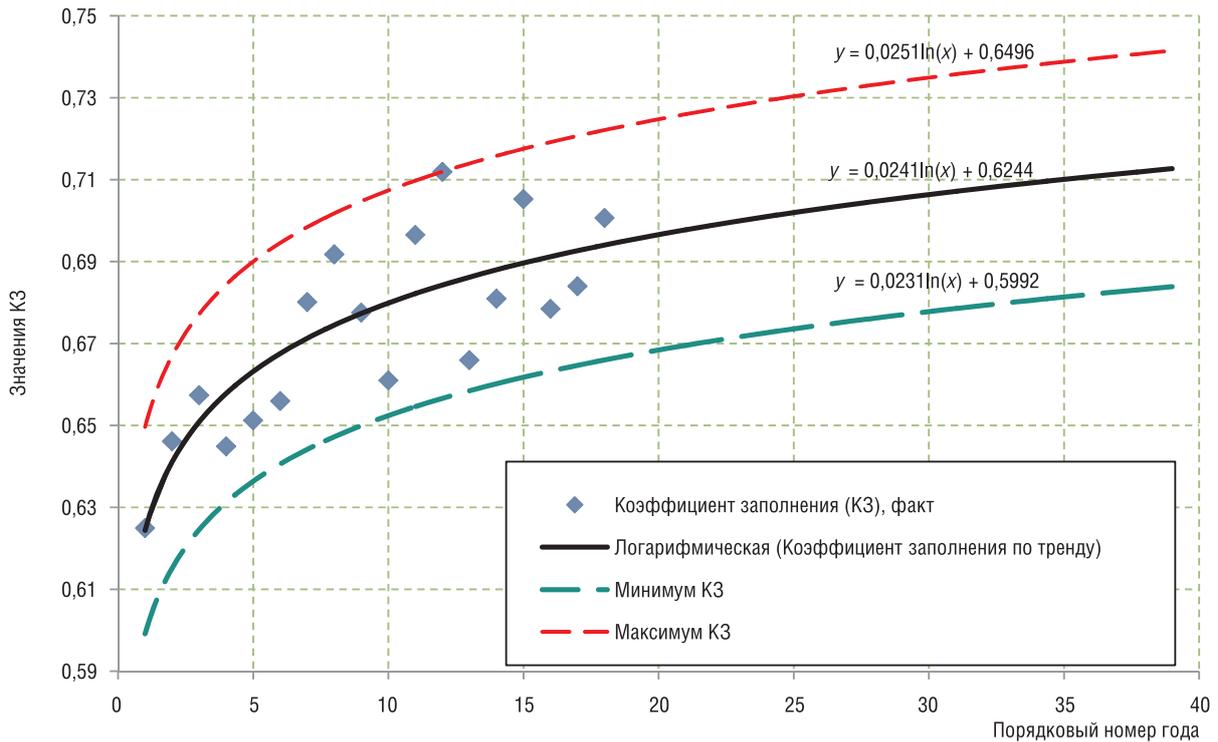


Рис. 3. Прогноз коэффициента заполнения графика электрической нагрузки

Fig. 3. Forecast of the load factor of electric load graph

Аналогичным методом выполнен прогноз коэффициента неравномерности графика электрической нагрузки. Результаты показаны на рис. 4.

Полученных данных достаточно для разработки различных сценариев формы графика продолжительности нагрузки на длительных временных периодах. Однако для проведения оптимизационных расчетов не менее важно иметь прогноз такой важной характеристики электрогенерирующей системы, как пиковая нагрузка.

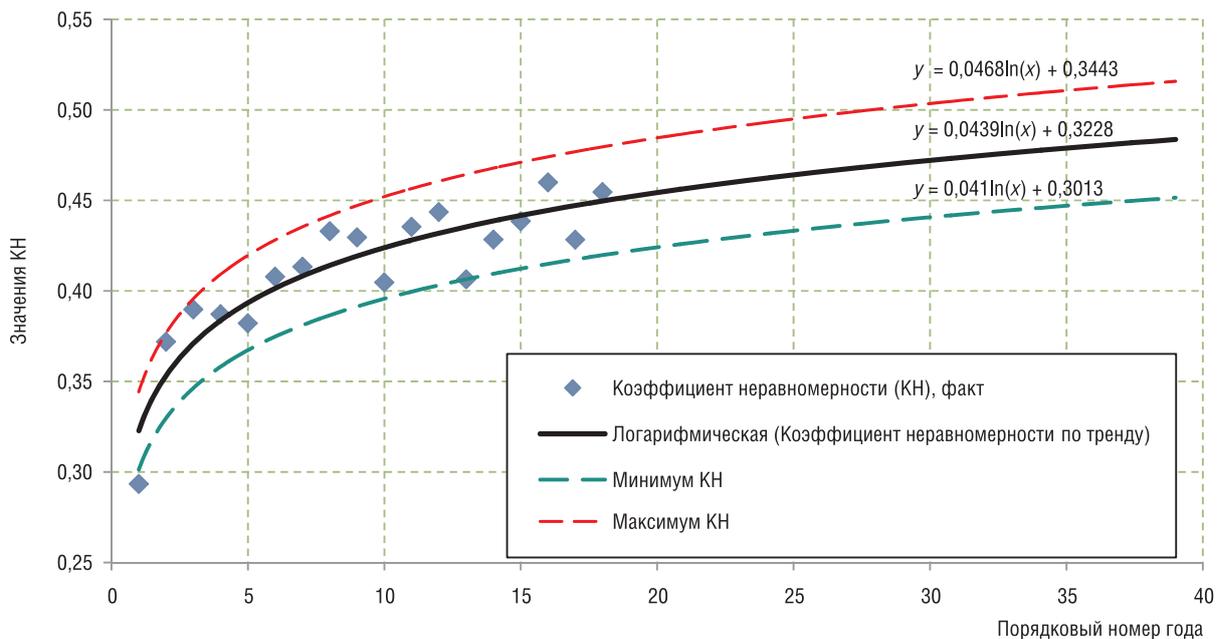


Рис. 4. Прогноз коэффициента неравномерности графика электрической нагрузки

Fig. 4. Forecast of the unevenness coefficient

Для прогнозирования пикової нагрузки энергосистемы, обязательной для перевода относительных значений графика продолжительности нагрузки в абсолютные, целесообразно воспользоваться связью между объемом потребления электроэнергии, коэффициентом заполнения графика нагрузки и пикової нагрузкой:

$$P = \frac{\mathcal{E}_{\text{потр}}}{8760K_3}, \quad (3)$$

где P – пиковая нагрузка, МВт; $\mathcal{E}_{\text{потр}}$ – объем потребления электроэнергии, МВт·ч; K_3 – коэффициент заполнения графика нагрузки.

Проблема, таким образом, сводится к прогнозированию объемов потребления электроэнергии.

Прежде чем приступать к прогнозированию объемов потребления электроэнергии, следует отметить, что ошибки прогноза в сторону его занижения могут привести к ограничению возможностей экономического развития, поскольку последнее во многом определяется уровнем электропотребления. Поэтому предпочтение следует отдавать сценариям, дающим завышенную оценку. Второе соображение, которое также следует учесть, состоит в том, что поведение объемов потребления электроэнергии во времени, в отличие от коэффициентов заполнения и неравномерности, вероятнее всего, нельзя считать асимптотической функцией.

На рис. 5 сплошной линией показан линейный тренд развития фактических объемов электропотребления и его аналитическое представление. Там же построен тренд на основе логарифмической функции. Как видно из сравнения трендов, линейному тренду стоит отдать предпочтение не только потому, что он дает более высокое электропотребление, но и по причине более высокой статистической достоверности, которая демонстрируется большей величиной параметра R^2 . Штриховыми линиями с их аналитическим представлением показан на этом же рисунке «коридор» прогнозируемой величины электропотребления, построенный описанным выше методом.

Выполненные прогнозы «коридоров» коэффициентов заполнения и неравномерности графиков нагрузки будем использовать для получения крайних оценок их поведения во времени, которые можно назвать сценариями «минимум» и «максимум».

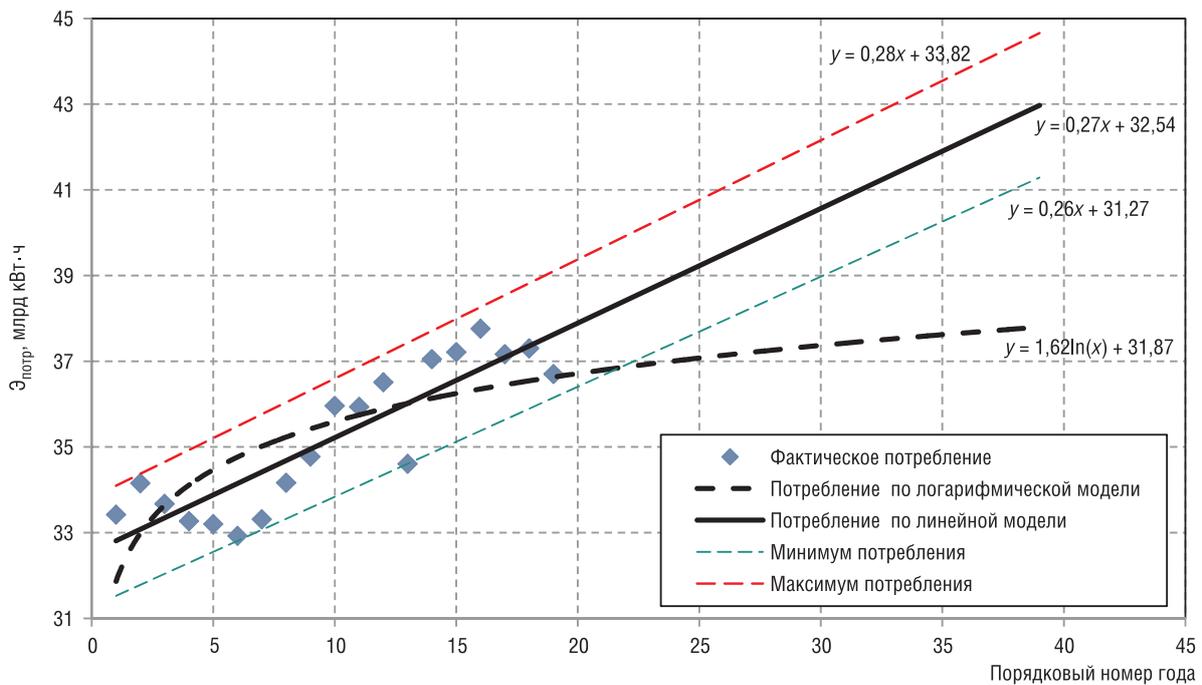


Рис. 5. Прогноз объемов потребления электроэнергии
 Fig. 5. Forecast of electricity consumption volumes

Под сценарием «минимум» коэффициентов заполнения и неравномерности будем понимать сценарий, дающий при переходе к абсолютным значениям минимальную пиковую нагрузку. Иначе говоря, данный сценарий характеризуется максимальными значениями коэффициентов заполнения и неравномерности.

Под сценарием «максимум» будем, напротив, понимать сценарий, дающий максимальную пиковую нагрузку в абсолютных единицах, то есть имеющий минимальные значения коэффициентов заполнения и неравномерности. В табл. 1 приведены параметры сценариев развития коэффициентов.

Т а б л и ц а 1. Сценарии коэффициентов заполнения и неравномерности

T a b l e 1. Scenarios of load factors and unevenness coefficients

Год	Сценарий «минимум»		Сценарий «максимум»	
	коэффициент заполнения «максимум»	коэффициент неравномерности «максимум»	коэффициент заполнения «минимум»	коэффициент неравномерности «минимум»
2020	0,729	0,493	0,673	0,432
2025	0,734	0,502	0,677	0,439
2030	0,738	0,509	0,681	0,446
2035	0,742	0,516	0,684	0,452

Для выбора значений графиков продолжительности нагрузки в реперных точках (см. [3]), необходимых для восстановления формы графиков, также можно воспользоваться трендами, построенными по имеющимся ретроспективным данным. В табл. 2 приведены тренды, построенные аналогичным методом по данным для Белорусской энергосистемы, для значений относительной графика продолжительности нагрузки в реперных точках 0,1; 0,2 и 0,9.

Т а б л и ц а 2. Тренды для выбора значений реперных точек

T a b l e 2. Trends for selecting of reference fixed points values

Реперная точка (в относительных единицах)	Сценарий коэффициентов	Вид функции тренда (x – порядковый номер года, для 1997 г. x = 1)
0,1	«Минимум»	$0,0105 \ln(x)+0,8633$
0,1	«Максимум»	$0,0099 \ln(x)+0,8113$
0,2	«Минимум»	$0,0172 \ln(x)+0,7895$
0,2	«Максимум»	$0,0158 \ln(x)+0,7295$
0,9	«Минимум»	$0,0378 \ln(x)+0,4630$
0,9	«Максимум»	$0,0334 \ln(x)+0,4096$

Используя данные табл. 1, 2 и метод восстановления, описанный в [3], получим коэффициенты полиномов для представления графиков продолжительности электрической нагрузки в относительном виде, приведенные в табл. 3 для ряда лет временного периода с 2020 по 2035 г.

Т а б л и ц а 3. Коэффициенты полиномов графиков продолжительности электрической нагрузки

T a b l e 3. Polynomial coefficients for load duration curves

Год	Сценарий	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5
2020	«Минимум»	1,000	-1,480	5,728	-14,014	15,612	-6,353
	«Максимум»	1,000	-2,364	9,916	-22,196	22,569	-8,493
2025	«Минимум»	1,000	-1,455	5,671	-13,933	15,542	-6,324
	«Максимум»	1,000	-2,339	9,849	-22,072	22,443	-8,441
2030	«Минимум»	1,000	-1,434	5,623	-13,864	15,484	-6,299
	«Максимум»	1,000	-2,319	9,792	-21,968	22,337	-8,397
2035	«Минимум»	1,000	-1,416	5,582	-13,805	15,433	-6,278
	«Максимум»	1,000	-2,301	9,744	-21,877	22,245	-8,359

Для прогнозирования крайних значений пикового и минимальной нагрузки энергосистемы в абсолютном выражении следует учесть возможность развития по «минимальному» и «максимальному» сценариям объемов электропотребления. Аналитические выражения для этих сценариев показаны на рис. 5. В табл. 4 приведены рассчитанные по этим выражениям значения объемов электропотребления для обоих сценариев.

Т а б л и ц а 4. Объемы электропотребления при «минимальном» и «максимальном» сценариях, млрд кВт·ч
T a b l e 4. Volumes of power consumption under “minimum” and “maximum” scenarios, billion kW·h

Год	Сценарий	
	«Минимум»	«Максимум»
2020	37,43	40,49
2025	38,72	41,88
2030	40,00	43,27
2035	41,29	44,66

В указанный в табл. 4 «коридор» изменения объемов электропотребления попадают их значения, прогнозируемые в «Концепции энергетической безопасности Республики Беларусь» [4] и приведенные в [5].

В комбинации с двумя сценариями поведения коэффициентов заполнения и неравномерности будем иметь четыре следующих сценария поведения характеристик графиков нагрузки:

1) сценарий «минимум – минимум» предполагает развитие объемов электропотребления на минимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с описанным сценарием «минимум»;

2) сценарий «минимум – максимум» предполагает развитие объемов электропотребления на минимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с описанным сценарием «максимум»;

3) сценарий «максимум – минимум» предполагает развитие объемов электропотребления на максимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с описанным сценарием «минимум»;

4) сценарий «максимум – максимум» предполагает развитие объемов электропотребления на максимальном уровне и коэффициентов заполнения и неравномерности в соответствии с описанным сценарием «максимум».

В табл. 5 приведены значения пикового и минимальной нагрузок системы для четырех сценариев поведения характеристик графиков нагрузки, рассчитанные исходя из данных табл. 4 и соответствующих значений коэффициентов заполнения и неравномерности графиков из табл. 1 по следующим очевидным формулам:

$$P_{\max} = \frac{\mathcal{E}_{\text{потр}} \cdot 10^6}{8760K_c}, \quad (4)$$

$$M_{\min} = P_{\max}K_n, \quad (5)$$

где P_{\max} и M_{\min} – пиковая и минимальная нагрузки, МВт; $\mathcal{E}_{\text{потр}}$ – объем потребления электроэнергии, млрд кВт·ч; K_n – коэффициент неравномерности для соответствующего сценария.

Полученные графики продолжительности электрической нагрузки по четырем указанным сценариям с помощью полиномов, коэффициенты которых приведены в табл. 3, и пиковой нагрузки из табл. 5 приведены на рис. 6 для 2020 г. По оси абсцисс отложено время в относительном виде, по оси ординат – электрическая мощность системы в абсолютном выражении.

Аналогичным образом, с использованием данных табл. 3 и 5, могут быть построены графики продолжительности электрической нагрузки для любого года рассматриваемого временного периода. На рис. 7 показаны графики для 2035 г.

Т а б л и ц а 5. Прогнозируемые пиковая и минимальная нагрузки энергосистемы, МВт

T a b l e 5. Predicted peak and minimum loads of the power system, MW

Год	Сценарий							
	«минимум – минимум»		«минимум – максимум»		«максимум – минимум»		«максимум – максимум»	
	P_{\max}	M_{\min}	P_{\max}	M_{\min}	P_{\max}	M_{\min}	P_{\max}	M_{\min}
2020	5859	2889	6353	2743	6337	3125	6872	2966
2025	6021	3022	6529	2869	6512	3268	7062	3104
2030	6187	3152	6709	2992	6692	3409	7256	3236
2035	6356	3278	6892	3112	6874	3545	7455	3366

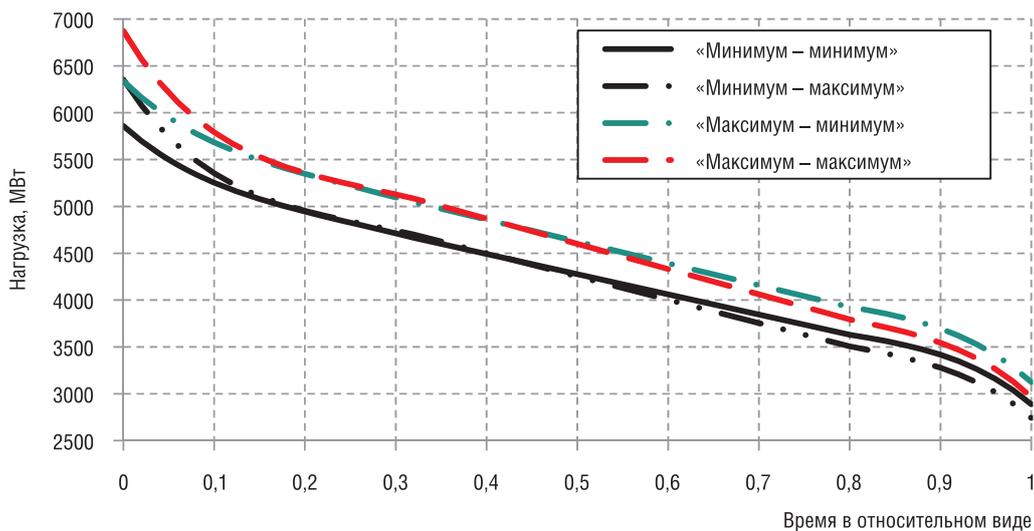


Рис. 6. Графики продолжительности электрической нагрузки в абсолютном выражении для 2020 г.

Fig. 6. The load duration curves in absolute terms for 2020

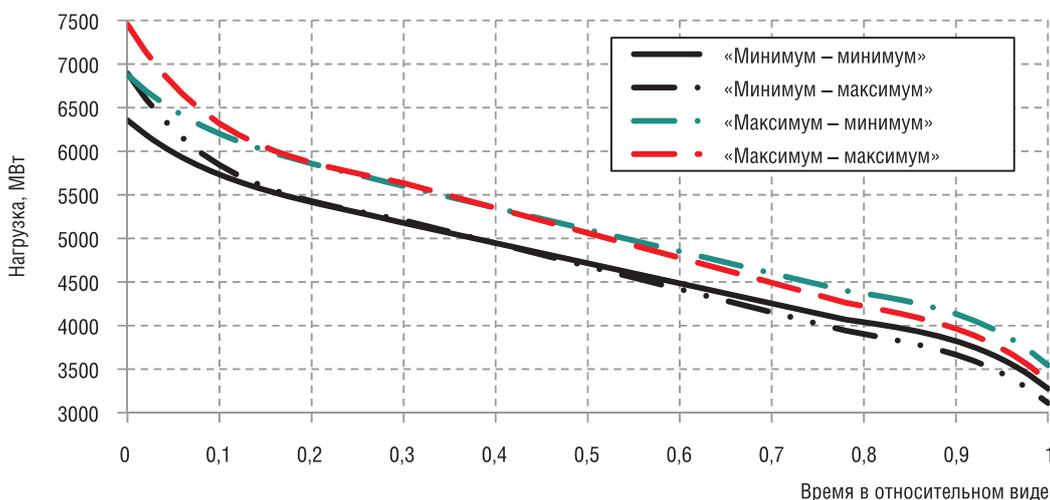


Рис. 7. Графики продолжительности электрической нагрузки в абсолютном выражении для 2035 г.

Fig. 7. The load duration curves in absolute terms for 2035

Как видно из рис. 6 и 7 и табл. 5, сценарии «минимум – максимум» и «максимум – минимум» дают близкие результаты по пиковой нагрузке. Пиковые нагрузки для этих сценариев лежат между таковыми для сценариев «минимум – минимум» и «максимум – максимум». Самая минимальная нагрузка характерна для сценария «минимум – максимум», имеющего как минимальное электропотребление, так и большой коэффициент неравномерности.

На рис. 8 показаны диапазоны изменения максимальных (P) и минимальных (M) нагрузок для этих сценариев на временном периоде 2020–2035 гг.

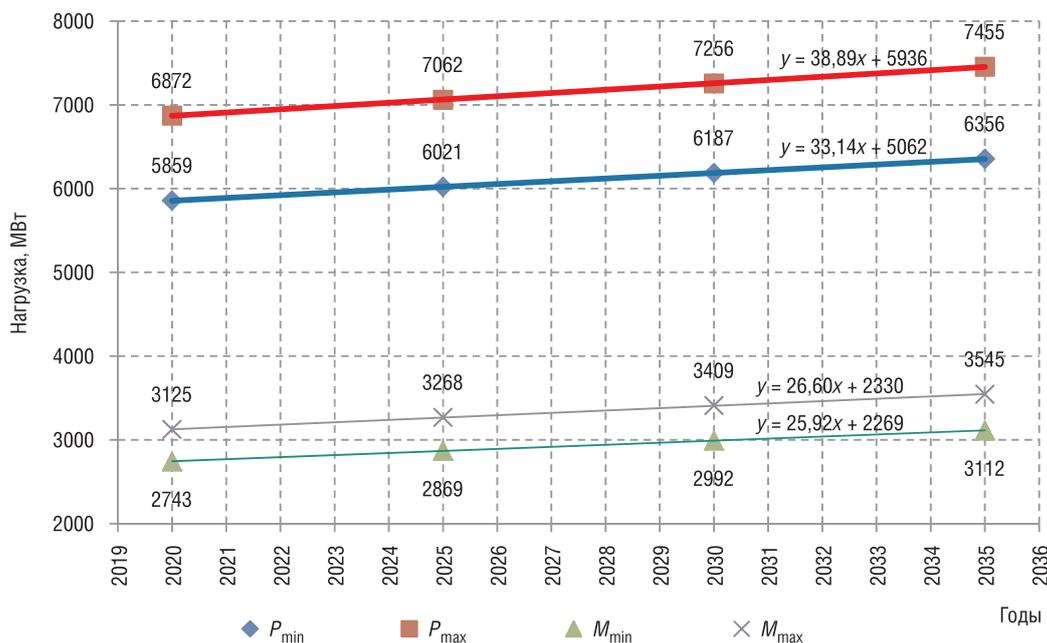


Рис. 8. Диапазоны изменения максимальных и минимальных нагрузок

Fig. 8. Ranges of maximum and minimum loads

В аналитических зависимостях нагрузок от времени, также приведенных на рис. 8, как и ранее, $x = Y - 1996$, где Y – календарный год.

Зависимости нагрузок от времени носят практически линейный характер, поскольку они определяются в основном принятым линейным характером сценариев развития объемов электропотребления.

Как видно из табл. 5 и рис. 8, для Белорусской энергосистемы возможный диапазон изменения пиковой нагрузки составляет более 1000 МВт, достигая к 2020 г. 5859–6872 МВт, к 2035 г. – 6356–7455 МВт. Диапазон изменения минимальной нагрузки для рассмотренных сценариев гораздо уже: 2743–3125 МВт в 2020 г. и 3112–3545 МВт в 2035 г.

Заключение. Описана методология прогнозирования основных характеристик графика продолжительности электрической нагрузки на основе предположения о вероятностном распределении значений относительно тренда, построенного на основе ретроспективной информации. Методология позволяет определить аналитические выражения полиномиального вида для оценки «коридоров» изменения коэффициентов заполнения и неравномерности графиков продолжительности электрической нагрузки на длительном временном интервале.

Методические результаты прогнозирования основных характеристик графика продолжительности электрической нагрузки применены к разработке ряда сценариев развития объемов электропотребления, пиковых и минимальных нагрузок Белорусской энергосистемы на временном периоде 2020–2035 гг.

Список использованных источников

1. Wien Automatic System Planning Package (WASP). A computer code for power generating system expansion planning. Version WASP-IV. User Manual [Electronic resource]. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2001. – Mode of access: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CMS-16.pdf> – Date of access: 05.07.2017.
2. Model for Analysis of the Energy Demand (MAED). User's Manual for Version MAED-1, IAEA-TECDOC-386 [Electronic resource]. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1986. – Mode of access: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/18/037/18037998.pdf – Date of access: 05.07.2017.
3. Мельников, А. С. Аналитическое представление графика продолжительности электрической нагрузки для оптимизационных исследований / А. С. Мельников, Б. И. Попов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 4. – С. 63–67.

4. Концепция энергетической безопасности Республики Беларусь: Постановление Совета Министров Респ. Беларусь 23.12.2015 №1084 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.government.by/upload/docs/file5a034ca617dc35eb.pdf> – Дата доступа: 01.07.2017.

5. Михалевич, А. А. Атомная энергетика и структура энергопотребления / А. А. Михалевич, С. А. Александрович // VI Междунар. конф. «Ядерные технологии XXI века»: доклады, Минск, 25–27 окт. 2016 г. – Минск: Право и экономика, 2016. – С. 11–15.

References

1. *Wien Automatic System Planning Package (WASP). A computer code for power generating system expansion planning. Version WASP-IV. User Manual.* Vienna, International Atomic Energy Agency, 2001. Available at: <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/CMS-16.pdf> (Accessed 5 July 2017).

2. *Model for Analysis of the Energy Demand (MAED). User's Manual for Version MAED-1, IAEA-TECDOC-386.* Vienna, International Atomic Energy Agency, 1986. Available at: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/18/037/18037998.pdf> (Accessed 5 July 2017).

3. Mel'nikov A. S., Popov B. I. Analytical representation of electrical load duration curve for optimization research. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 4, pp. 63–67 (in Russian).

4. The Concept of Energy Security of the Republic of Belarus. Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus on 23.12.2015 no. 1084. Available at: <http://www.government.by/upload/docs/file5a034ca617dc35eb.pdf> (Accessed 1 July 2017).

5. Mihalevich A. A., Aleksandrovich S. A. Nuclear power and structure of energy consumption. *VI Mezhdunarodnaya konferentsiya "Yadernye tekhnologii XXI veka": doklady, Minsk, 25–27 oktyabrya 2016 g.* [VI International Conference "Nuclear technologies of the 21th century": reports]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2016, pp. 11–15 (in Russian).

Информация об авторах

Мельников Алексей Сергеевич – аспирант, младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: melnikov1991@bk.ru

Попов Борис Игоревич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bipopovby@gmail.com

Information about the authors

Alexey S. Melnikov – Ph. D. Student, Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: melnikov1991@bk.ru

Boris I. Popov – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bipopovby@gmail.com

В. И. Орловская, А. Г. Трифонов

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Беларусь*

ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА ДОЗОВЫХ НАГРУЗОК НА ПЕРСОНАЛ ТИПОВОЙ АЭС-2006 ПРИ ПРОЕКТНЫХ АВАРИЯХ С УЧЕТОМ ИНФРАСТРУКТУРЫ ПРОМПЛОЩАДКИ

Аннотация. Приводятся результаты оценки радиационного воздействия выбросов радиоактивных веществ на персонал атомной электрической станции в случае проектной аварии, а именно рассмотрена авария, связанная с падением при перегрузке топлива отработавшей кассеты на кассеты, расположенные в активной зоне реактора или бассейне выдержки.

Для анализа дозовых нагрузок на персонал станции проведены оценка осаждения радиоактивных веществ на характерных поверхностях территории промышленной площадки станции и расчеты распределения относительной концентрации радиоактивных аэрозолей по зонам удаления от источника выброса с использованием программного модуля, созданного в среде разработки компьютерных программ COMSOL 3.5a. В основу разработки данного программного модуля положен максимальный учет деталей инфраструктуры промышленной площадки атомной электрической станции по генеральному плану, что позволяет получить более точную оценку осаждения радиоактивных веществ и, как следствие, более точный расчет дозовых нагрузок на персонал и население. Рассчитаны средние объемные активности радионуклидов в приземном слое воздуха на территории площадки станции при проектных авариях с реакторами типа ВВЭР.

Прогнозная оценка дозовых нагрузок на персонал АЭС от радиоактивного облака и внутреннего облучения за счет ингаляции выполнялась с учетом таких радионуклидов, как ^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{90}Sr .

Полученная величина общей эффективной дозы облучения персонала за первые 8 ч после начала проектной аварии, связанной с падением кассеты при перегрузке топлива, составляет 7,80 мЗв, что существенно ниже порогового значения предела допустимой годовой дозы для персонала в аварийных ситуациях (50 мЗв).

Ключевые слова: дозовые нагрузки, проектная авария, объемная активность, эффективная доза, ингаляционная доза

Для цитирования: Орловская, В. И. Прогнозная оценка дозовых нагрузок на персонал типовой АЭС-2006 при проектных авариях с учетом инфраструктуры промплощадки / В. И. Орловская, А. Г. Трифонов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 111–118.

V. I. Orlovskaya, A. G. Trifonov

Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

DOSE ASSESSMENT FOR TYPICAL NPP-2006 STAFF FOR DESIGN BASIS ACCIDENT TAKING INTO ACCOUNT SITE INFRASTRUCTURE

Abstract. Assessment of radiation effect on nuclear power plant staff was made for design basis accident. The considered accident scenario includes spent fuel assembly drop into the reactor core or fuel pool during load-unload operations with fuel assemblies damage and radionuclide emission.

The proposed method included the assessment of radionuclide sedimentation on characteristic surfaces of nuclear power plant site, calculations of radioactive aerosol distribution depending on the distance of emission source in COMSOL 3.5 program. The software module is based on highly detailed account of the infrastructure of the nuclear power plant industrial site according to the master plan, which allows obtaining more accurate estimation of radioactive substances deposition and, as a result, more accurate calculation of doses for staff and population. The assessment of average volume activity in lower air layer on site during VVER design basis accident is performed.

Doses from radioactive cloud (external exposure) and from inhalation (internal exposure) were estimated for following radionuclides: ^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{90}Sr .

In the case of the design basis accident associated with the fall of the assembly during fuel load-unload operations the received value of the total effective dose of staff exposure is 7.80 mSv for the first 8 hours after the accident beginning. This number is well below the threshold of the allowable annual dose limit for personnel in emergency situations (50 mSv).

Keywords: dose, design basis accident, volume activity, effective dose, inhalation dose

For citation. Orlovskaya V. I., Trifonov A. G. Dose assessment for typical NPP-2006 staff for design basis accident taking into account site infrastructure. *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. 1, pp. 111–118 (in Russian).

Введение. Основным требованием радиационной безопасности является принцип неперевышения основных пределов доз облучения персонала и населения.

Радиационная безопасность персонала АЭС в аварийных ситуациях обеспечивается за счет анализа уровней возможного радиоактивного загрязнения и принятия научно обоснованных мер по защите.

Противоаварийное планирование включает в себя внешний и внутренний аварийные планы. В соответствии с Положением об условиях и порядке разработки аварийных планов, утвержденным постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 27.08.2010 № 1242, внутренний аварийный план в части оценки радиационного воздействия на персонал и действий персонала должен содержать сценарии возникновения радиационных аварий, стадии развития и масштабы их последствий, а также порядок осуществления радиационного контроля в случае радиационной аварии и мероприятия по обеспечению радиационной защиты персонала объекта использования атомной энергии. Следовательно, возможные дозовые нагрузки на персонал при различных аварийных ситуациях должны быть рассчитаны и включены в мероприятия по внутреннему аварийному плану.

Анализ влияния ионизирующего излучения на организм человека. При возникновении аварийной ситуации с выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду происходит внешнее и внутреннее воздействия на организм человека.

Внешнее облучение может быть обусловлено прямым излучением от источника, от содержащихся в воздухе радионуклидов (иммерсия, или облучение от шлейфа), от радионуклидов, выпавших на землю или осевших на одежду либо кожу человека. Внутреннее облучение происходит при попадании радиоактивных веществ через дыхательные пути (ингаляционно) непосредственно из шлейфа или ресуспендированного материала с загрязненных поверхностей; пероральном поступлении загрязненных продуктов питания и воды; попадании радионуклидов внутрь организма через открытые раны (перкутатно) [1, 2].

Эффект облучения зависит от величины поглощенной дозы, ее мощности, вида излучения, радиационной чувствительности облучаемого объекта и его компонентов.

В зависимости от вида облучения и способа поступления радиоактивных веществ в организм человека определяют дозу внешнего и дозу внутреннего облучения. По полученным результатам рассчитывают уровень воздействия и ущерба здоровью человека.

Для персонала АЭС, который в случае возникновения аварийной ситуации с выбросом радиоактивных веществ будет действовать практически с первых минут, наиболее дозообразующим станет ингаляционный путь воздействия.

Методика расчета распределения объемной активности радионуклидов на промплощадке станции при различных аварийных ситуациях. Для оценки осаждения радиоактивных веществ на характерных поверхностях территории атомной электрической станции в аварийных ситуациях и моделирования потока и транспортируемой дисперсной примеси была выбрана система уравнений сохранения для отдельных фаз, которые решаются численно совместно с уравнениями, описывающими процессы межфазного переноса и динамику межфазных поверхностей. Для учета миграции радионуклидов в потоке в систему уравнений вводились уравнения движения и сохранения аэрозольных частиц.

Данная система уравнений сохранения дополняется соответствующими наборами начальных и граничных условий, а также интегральными параметрами работы техногенных источников.

Для моделирования динамики потока принята следующая система уравнений сохранения [3]:

$$\frac{\partial \rho W_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial W_i}{\partial t} + W_j \frac{\partial W_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\nu_E \frac{\partial W_i}{\partial x_j} - \overline{W_i'W_j'} \right) + g_i \delta_{ij}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + W_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a_E \frac{\partial T}{\partial x_j} \right), \quad (3)$$

где $\overline{W_i'W_j'} = -\nu_E \left(\frac{\partial W_i}{\partial x_j} + \frac{\partial W_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} K_j$, W_i и W_j – компоненты скорости транспортного потока вдоль осей x_i и x_j (в данной модели $i, j = 1, 2, 3, i \neq j, x_1, x_2, x_3$ – пространственные координаты), м/с; t – время, с; P – давление, Па; T – температура, К; ρ – плотность, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с²; ν, a – коэффициенты кинематической вязкости, температуропроводности, м²/с; K – турбулентная кинетическая энергия согласно « k - ϵ »-модели турбулентности, Дж/м³; индекс E – эффективное значение с учетом принятой модели турбулентности.

Для описания миграции радионуклидов в потоке в исходную систему сохранения вводится уравнение движения и сохранения концентрации аэрозольных частиц [3]:

$$\frac{\partial C_k}{\partial t} + W_i \frac{\partial C_k}{\partial x_i} = \tilde{\nabla} \left(D_k \tilde{\nabla} (C_k) \right) - \lambda_k C_k, \quad (4)$$

где C_k – концентрация аэрозольных частиц фракции k в несущем потоке, кг/м³; D_k – коэффициент диффузии аэрозольных частиц фракции k в несущем потоке, м²/с; $\tilde{\nabla}$ – оператор дифференцирования по x_i, x_j ; λ_k – постоянная распада рассматриваемого радионуклида, с⁻¹.

Уравнения (1)–(4) были дополнены начальными и граничными условиями с учетом генерального плана АЭС, метеорологическими данными на площадке размещения станции. Данная модель позволяет учитывать выбросы из вентиляционной трубы и при нарушении целостности контеймента [4].

Приведенные уравнения были реализованы в среде разработки компьютерных программ COMSOL 3.5a. Созданный программный модуль позволяет провести расчеты по динамике распределения концентраций компонентов выброса на площадке станции с учетом ее инфраструктуры. На рис. 1 представлена разработанная с использованием COMSOL 3.5a модель площадки типовой АЭС-2006.

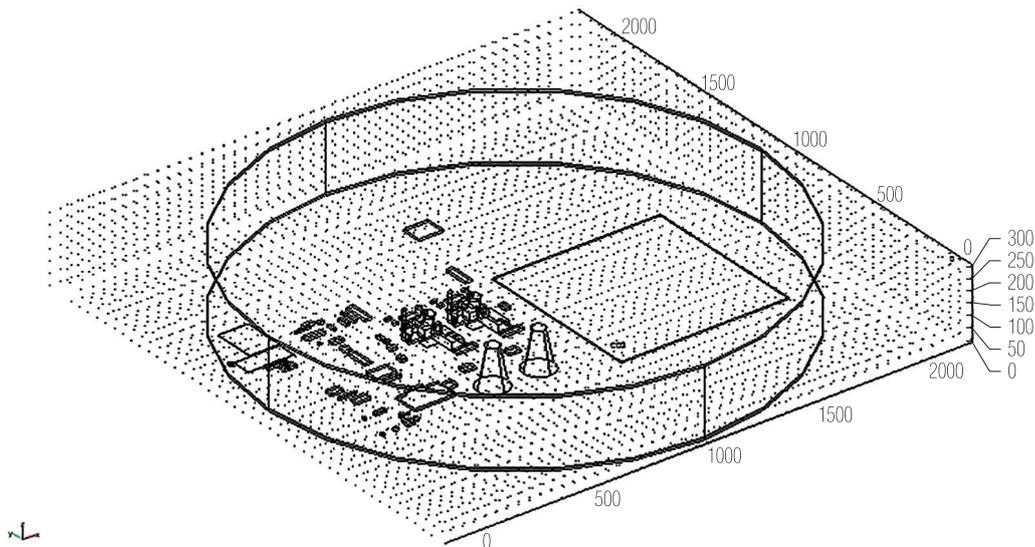


Рис. 1. Модель площадки типовой АЭС-2006

Fig. 1. Model of typical NPP-2006 site

Визуализация результатов расчета динамики распространения выбросов загрязняющих веществ, включая радиоактивные аэрозоли, представлена на рис. 2.

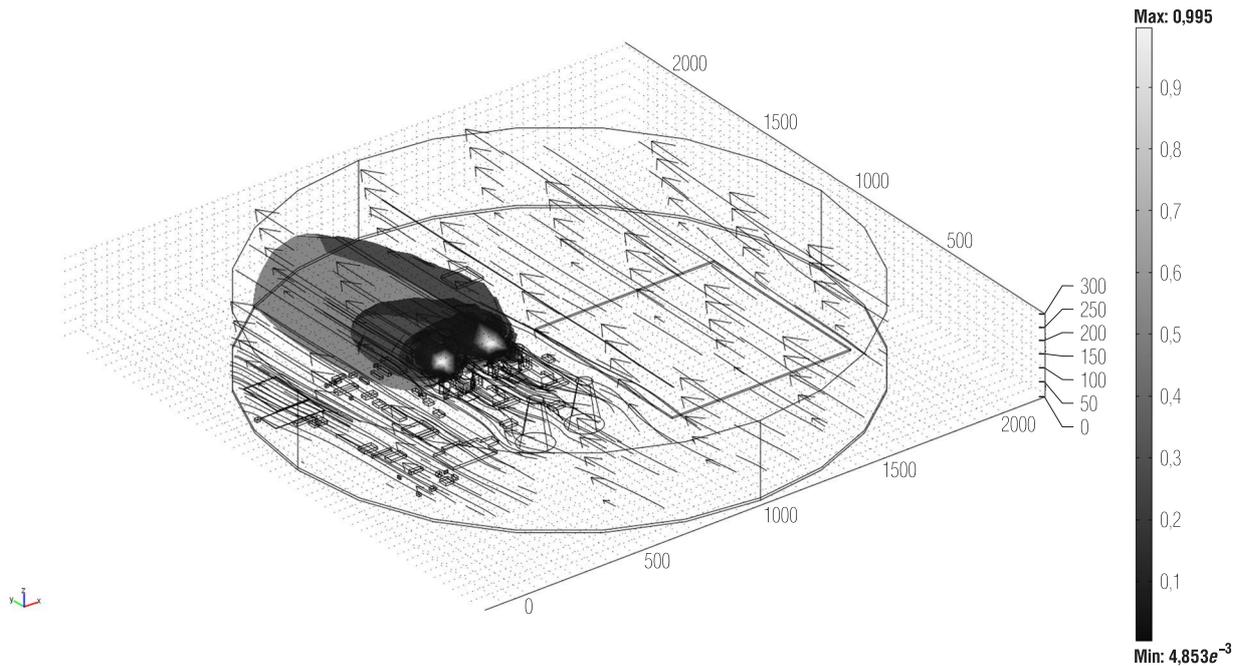


Рис. 2. Распространение выбросов радионуклидов в аварийных ситуациях из вентиляционной трубы
 Fig. 2. Distribution of radionuclide emissions in emergency situations from a ventilation pipe

Для верификации представленного программного модуля были проведены ряд расчетов и их сравнительный анализ с расчетными кодами, разработанными Институтом проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН). Полученные результаты сравнения разработанного программного модуля на основе COMSOL 3.5a показали удовлетворительные совпадения с данными по стандартному образцу и данными ИБРАЭ РАН (расхождение в значениях не более 5 %). Проведенное сравнение подтверждает достоверность разработанного программного модуля, на основании чего можно сделать вывод о возможности его использования для обоснования безопасности строящейся АЭС в Республике Беларусь [4].

В данной работе для расчета распределения активности радионуклидов в пределах площадки АЭС и расчета дозовых нагрузок на персонал в случае проектных аварий рассмотрена авария, связанная с падением при перегрузке топлива отработавшей кассеты на кассеты, расположенные в активной зоне реактора или бассейне выдержки. При этом предполагается, что во время соударения падающей кассеты с другими кассетами (3 шт.) происходит нарушение герметичности оболочек твэлов и выход активных продуктов деления.

Объем выброса (Q_v) через вентиляционную трубу может быть оценен по геометрическим параметрам трубы, максимальной скорости потока и продолжительности выброса с использованием следующей формулы (вариант 1):

$$Q_{v1} = Swt, \quad (5)$$

где S – площадь сечения потока, m^2 (площадь поперечного сечения вентиляционной трубы реакторного здания $2,54 m^2$); w – максимальная скорость потока, m/s (15 m/s); t – продолжительность выброса, s .

Также для оценки аварийного выброса может быть принят сценарий, что 100 % расхода приточной и вытяжной ремонтно-аварийной системы вентиляции здания реактора в течение 0,5 ч выбрасывается за пределы станции через вентиляционную трубу без фильтрации (вариант 2):

$$Q_{v2} = R_S t, \quad (6)$$

где R_S – расход в системе, $m^3/ч$ (расход приточной и вытяжной ремонтно-аварийной системы вентиляции здания реактора равен $50\,000 m^3/ч$); t – продолжительность выброса, $ч$.

Рассматривались оба варианта оценки объема аварийного выброса.

Расчет объемной активности радионуклидов c_i для каждого из них выполнялся согласно выражению

$$c_i = \frac{R}{Q_v}, \quad (7)$$

где R – величина выброса, Бк.

Полученные значения объемной активности соответствуют значениям на выходе из вентиляционной трубы.

Исходными данными по радионуклидному составу выброса и активности выбрасываемых радионуклидов были приняты результаты из предварительного отчета по безопасности Белорусской АЭС.

Для рассматриваемой проектной аварии выход активных продуктов деления из-под оболочек максимально напряженных твэлов отработавшей кассеты при падении кассеты во время перегрузки топлива приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Аварийный выброс в атмосферу через вентиляционную трубу при падении кассеты во время перегрузки топлива (проектная авария)

Table 1. Radionuclide emergency release from ventilation pipe for design basis accident (spent fuel assembly drop during load-unload operations)

Радионуклид	Период полураспада	Выброс в атмосферу через вентиляционную трубу при аварии, ГБк	Рассчитанные (вариант 1) объемные активности радионуклидов на выходе из вентрубы, кБк/м ³	Рассчитанные (вариант 2) объемные активности радионуклидов на выходе из вентрубы, кБк/м ³
⁹⁰ Sr	28 лет	$9,58 \cdot 10^{-2}$	1,40	3,83
¹³⁷ Cs	30 лет	$3,14 \cdot 10^0$	$4,58 \cdot 10^1$	$1,26 \cdot 10^2$
¹³¹ I	8 сут	$4,97 \cdot 10^1$	$7,25 \cdot 10^2$	$1,99 \cdot 10^3$
¹³³ I	21 ч	$3,34 \cdot 10^0$	$4,87 \cdot 10^1$	$1,34 \cdot 10^2$

Результаты расчетов. Оценка объемных активностей радионуклидов в приземном слое воздуха. С помощью разработанного программного модуля были проведены расчеты средних уровней объемной активности радионуклидов в приземном слое воздуха на территории промплощадки станции по зонам удаления от источника распространения.

Пример результатов расчета объемных активностей радионуклидов в приземном слое воздуха при падении кассеты во время перегрузки топлива приведен в табл. 2, 3.

Данные, приведенные в табл. 2, 3, показывают, что объемные активности радионуклидов в приземном слое воздуха, рассчитанные по варианту 2, больше, чем по варианту 1. Для дальнейших расчетов дозовых нагрузок на персонал атомной электрической станции использовались более консервативные данные из табл. 3.

Т а б л и ц а 2. Средние объемные активности радионуклидов в приземном слое воздуха (на высоте 1 м над подстилающей поверхностью) на промплощадке при скорости ветра 10 м/с. Скорость осаждения 0,05 м/с (для варианта 1)

Table 2. Average volume activities of radionuclides in lower air layer (1 m above surface) on NPP site. Wind speed is 10 m/s, deposition rate is 0,05 m/s (calculation option 1)

Радионуклид	Объемная активность, кБк/м ³					
	на выходе из вентрубы (вариант 1)	зона 1 (~190–270 м)	зона 2 (~270–370 м)	зона 3 (~370–490 м)	зона 4 (~490–660 м)	зона 5 (~660–900 м)
⁹⁰ Sr	1,4	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01
¹³⁷ Cs	45,8	1,37	1,15	0,92	0,69	0,46
¹³¹ I	725,0	21,75	18,13	14,50	10,88	7,25
¹³³ I	48,7	1,46	1,22	0,97	0,73	0,49

Т а б л и ц а 3. Средние объемные активности радионуклидов в приземном слое воздуха (на высоте 1 м над подстилающей поверхностью) на площадке при скорости ветра 10 м/с. Скорость осаждения 0,05 м/с (для варианта 2)

T a b l e 3. Average volume activities of radionuclides in lower air layer (1 m above surface) on NPP site. Wind speed is 10 m/s, deposition rate is 0,05 m/s (calculation option 2)

Радионуклид	Объемная активность, кБк/м ³					
	на выходе из вентрубы (вариант 2)	зона 1 (~190–270 м)	зона 2 (~270–370 м)	зона 3 (~370–490 м)	зона 4 (~490–660 м)	зона 5 (~660–900 м)
⁹⁰ Sr	3,83	0,11	0,09	0,08	0,06	0,04
¹³⁷ Cs	126,00	3,78	3,15	2,52	1,90	1,26
¹³¹ I	1990,00	59,70	49,75	39,80	29,85	19,90
¹³³ I	134,00	4,02	3,35	2,68	2,01	1,34

Прогнозная оценка дозовых нагрузок на персонал атомной электрической станции при проектных авариях. При оценке дозовых нагрузок на персонал АЭС были приняты следующие допущения:

краткосрочность облучения, когда ожидаются постоянные условия переноса и состав выбросов, то есть расчет выполняется без учета изменения направления ветра в течение периода облучения; не учитывается уменьшение облучения из-за частичного пребывания в укрытии; облучаемый персонал – взрослые люди (возраст больше 18 лет), с объемом дыхания 1,4 м³/ч, выполняющие легкую физическую работу, не употребляющие загрязненные продукты питания.

Для этих условий прогнозная оценка общей эффективной дозы выполнялась с учетом внешнего облучения от облака и выпадений на поверхность площадки, а также внутреннего облучения за счет ингаляционного поступления:

$$E_T = (E_a + E_g) + E_{inh}, \quad (8)$$

где E_T – общая эффективная доза, мЗв; E_a – эффективная доза от радионуклидов в воздухе (в облаке), мЗв; E_g – эффективная доза от радионуклидов в выпадениях, мЗв; E_{inh} – эффективная доза от ингаляции, мЗв.

Расчет эффективной дозы от содержащихся в воздухе и выпадениях радионуклидов ($E_a + E_g$) проводился по формуле

$$(E_a + E_g) = K \sum_{i=1}^n C_i e_i T_e, \quad (9)$$

где T_e – продолжительность облучения, ч; C_i – концентрация i -го радионуклида в приземном слое воздуха, кБк/м³; e_i – дозовый коэффициент, определяемый как мощность поглощенной дозы гамма-излучения i -го радионуклида на высоте 1 м над подстилающей поверхностью от источника в виде радиоактивного облака, (мГр/ч)/(кБк/м³); K – коэффициент перехода от дозы в воздухе на высоте 1 м над подстилающей поверхностью к эффективной дозе для представителей i -й группы населения при облучении от радиоактивного облака, мЗв/мГр.

Эффективная ингаляционная доза от вдыхания загрязненного радионуклидами воздуха рассчитывается по следующей формуле¹:

$$E_{inh} = 10^6 \sum_{i=1}^n (C_i e^i) T_e V, \quad (10)$$

где e^i – дозовый коэффициент для персонала для i -го радионуклида, Зв/Бк; V – интенсивность дыхания, м³/ч.

По приведенным формулам была рассчитана суммарная ингаляционная доза, эффективная доза внешнего облучения и общая эффективная доза облучения персонала на площадке АЭС.

¹ Методические рекомендации МР 2.6.1.0063-12.

Дозовые нагрузки на персонал АЭС в случае проектной аварии с падением кассеты при перегрузке топлива оценивались с учетом загрязнения, формируемого такими радионуклидами, как ^{137}Cs , ^{131}I , ^{133}I , ^{90}Sr . Расчет выполнялся для летних и зимних условий. Температура воздуха была принята $20\text{ }^\circ\text{C}$ для летних условий и $-20\text{ }^\circ\text{C}$ для зимних условий. Максимальная скорость ветрового потока 0 (штиль), 10, 20 м/с на высоте 300 м. Скорость осаждения примесных аэрозолей принималась равной 0,001, 0,005, 0,05 м/с, что соответствует размеру аэрозолей 3, 4 и 15 мкм при плотности 2000 кг/м^3 .

В качестве примера расчета дозовых нагрузок авторами настоящей статьи приведен расчет прогнозной оценки аварийных доз персонала на промплощадке для летних условий, скорость ветра принята 10 м/с, скорость осаждения примесных аэрозолей – 0,05 м/с. Результаты расчета прогнозной оценки аварийных доз персонала при проектной аварии (за первые 8 ч) представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Прогнозная оценка аварийных доз персонала на промплощадке при скорости ветра 10 м/с и скорости осаждения 0,05 м/с

Table 4. The predictive assessment of staff emergency doses at site for design accident. Wind speed is 10 m/s, deposition rate is 0,05 m/s

Доза облучения	Величина дозы облучения, мЗв				
	зона 1 (~190–270 м)	зона 2 (~270–370 м)	зона 3 (~370–490 м)	зона 4 (~490–660 м)	зона 5 (~660–900 м)
Эффективная доза от ингаляции, мЗв					
^{90}Sr	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02
^{137}Cs	0,28	0,24	0,19	0,15	0,10
^{131}I	7,35	6,13	4,90	3,68	2,45
^{133}I	0,10	0,08	0,07	0,05	0,03
Суммарная эффективная доза от ингаляции, мЗв	7,77	6,48	5,19	3,90	2,60
Доза от внешнего облучения, мЗв	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01
Общая эффективная доза, мЗв	7,80	6,51	5,21	3,92	2,61

Таким образом, для наиболее загрязненной зоны 1 доза облучения персонала за первые 8 ч после аварии за счет внешнего облучения составит 0,03 мЗв, доза от ингаляции – 7,77 мЗв. Общая эффективная доза облучения персонала за указанное время нахождения на площадке в случае проектной аварии с падением кассеты при перегрузке топлива будет равна 7,80 мЗв, что существенно ниже порогового значения предела допустимой годовой дозы для персонала в аварийных ситуациях (50 мЗв).

Анализируя полученные значения, можно сделать вывод, что основной вклад в аварийную дозу облучения будут вносить короткоживущие изотопы йода. Следовательно, использование таких защитных мероприятий, как блокирование щитовидной железы и защита органов дыхания, могут существенно уменьшить полученные персоналом дозы.

Полученные значения прогнозных доз облучения хорошо согласуются с результатами, представленными в предварительном отчете по безопасности Белорусской АЭС.

Заключение. В работе показана применимость разработанного программного модуля и метода расчета для прогнозной оценки доз персонала АЭС-2006 при проектной аварии. Из анализа полученных результатов расчетов можно сделать вывод, что основной вклад в аварийную дозу облучения будут вносить короткоживущие изотопы йода, а основным путем формирования дозы облучения персонала выступит ингаляционный путь. Следовательно, в случае проектной аварии с выбросом радиоактивных веществ через вентиляционную трубу необходимо немедленно принять следующие предупредительные защитные меры для снижения доз внутреннего и внешнего облучения ниже общих критериев: защита щитовидной железы (назначение препаратов стабильного йода), использование средств индивидуальной защиты, защита органов дыхания, укрытие.

Разработанный метод расчета дозовых нагрузок может быть применен для анализа радиационных последствий аварий на объектах использования атомной энергии, оценки риска и ущерба здоровью персонала и разработки мер по обеспечению радиационной защиты.

Список использованных источников

1. Белозерский, Г. Н. Радиационная экология: учебник / Г. Н. Белозерский. – М.: Академия, 2008. – 382 с.
2. Труды ИБРАЭ РАН / под общ. ред. Л. А. Большова; Ин-т проблем безопасного развития атомной энергетики РАН. – М.: Наука, 2009. – Вып. 11: Вопросы радиоэкологии / науч. ред. И. И. Линге. – 444 с.
3. Pugliese, S. Finite element modeling of plume dispersion in the lower part of the atmosphere / S. Pugliese, M. Jaeger, R. Occelli // *Air Pollution. Monitoring, Simulation and Control* / eds.: B. Caussade, H. Power, C. A. Brebbia. – Southampton: Comp. Mech. Pub., 1996. – P. 99–108.
4. Андрижиевский, А. А. Анализ процессов переноса и осаждения аэрозольных частиц на характерных поверхностях инфраструктуры АЭС / А. А. Андрижиевский, А. Г. Трифонов, Л. С. Кулик // Труды БГТУ. Сер. 3. Химия и технология неорганических веществ. – 2014. – №3 (167). – С. 89–93.

References

1. Belozerskii G. N. *Radiation ecology*. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 382 p. (in Russian).
2. Bolshov L. A., Linge I. I. (eds.). *Proceedings of IBRAE RAS. Issue 11: Radioecology Issues*. Moscow, Academy Publ., 2009. 444 p. (in Russian).
3. Pugliese S., Jaeger M., Occelli R. Finite element modeling of plume dispersion in the lower part of the atmosphere. Caussade B., Power H., Brebbia C. A. (eds.) *Air Pollution. Monitoring, Simulation and Control*. Southampton, Comp. Mech. Pub., 1996, pp. 99–108.
4. Andrizhievskiy A. A., Trifonov A. G., Kulik L. S. Analysis of transfer and deposition processes of aerosol particles on the characteristic surfaces of NPP infrastructure. *Trudy BGTU. Ser. 3. Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veschestv* [Proceedings of BSTU. Chemistry and technology of inorganic substances], 2014, no. 3 (167), pp. 89–93 (in Russian).

Информация об авторах

Орловская Валентина Игоревна – младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: valentina.valentina.orlovskaya@mail.ru

Трифонов Александр Георгиевич – доктор технических наук, доцент, заместитель генерального директора по науке, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tral@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Valentina I. Orlovskaya – Junior Researcher, 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: valentina.valentina.orlovskaya@mail.ru

Alexander G. Trifonov – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director General on science work, 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: tral@sosny.bas-net.by

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ
INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

УДК 528.8:629.7

Поступила в редакцию 22.09.2017
Received 22.09.2017

**Буй Куанг Гуи¹, Буй Доан Чанг¹, Д. А. Горский³, С. А. Золотой³, Нгуен Лан Ань¹,
Нгуен Минь Нгок¹, И. Б. Страшко³, Хо Ву Туу Джан², Чу Ксан Гуи¹**

¹*Институт космических технологий Вьетнамской академии наук и технологий, Ханой, Вьетнам*

²*Университет безопасности в г. Хошимин, Хошимин, Вьетнам*

³*НИРУП «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ КООРДИНАЦИИ ПРОЦЕССОВ СЪЕМКИ
ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ VNREDSat-1 (ВЬЕТНАМ)
И БКА (БЕЛАРУСЬ)**

Аннотация. Ведущие компании в области получения данных дистанционного зондирования Земли из космоса строят группировки космических аппаратов для увеличения периодичности (кратности) и ведения мониторинга различных участков земной поверхности. Группировка космических аппаратов дистанционного зондирования компании Airbus (Франция) позволяет ежедневно наблюдать любую точку поверхности Земли с высоким пространственным разрешением, а группировка компании DigitalGlobe (США) – со сверхвысоким пространственным разрешением. Наряду с этим запускается большое количество аппаратов дистанционного зондирования Земли в рамках национальных космических программ стран. Группировки космических аппаратов в таких странах незначительные. Проведен анализ перспектив совместного использования национальных космических систем Социалистической Республики Вьетнам и Республики Беларусь. Путем сопоставления пространственно-временных (орбитальные характеристики, цикличность орбит) и спектрально-энергетических (пространственное, спектральное и радиометрическое разрешение) характеристик функционирующих в настоящее время космических аппаратов дистанционного зондирования Земли VNREDSat-1 (Вьетнам) и БКА (Беларусь) проанализированы возможности их совместного использования для мониторинга природных ресурсов, окружающей среды и стихийных бедствий. Выявлена приемлемая для решения перечисленных задач степень корреляции технических параметров с учетом различных фаз данных космических аппаратов. Выводы подкреплены результатами натурных экспериментов с использованием архивных и оперативных данных дистанционного зондирования Земли, получаемых национальными космическими аппаратами.

Ключевые слова: космический аппарат (КА), спутник, вьетнамский космический аппарат (VNREDSat-1), белорусский космический аппарат (БКА), дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ)

Для цитирования. Исследование возможности координации процессов съемки поверхности Земли космическими аппаратами VNREDSat-1 (Вьетнам) и БКА (Беларусь) / Буй Куанг Гуи [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 119–128.

**Bui Quang Huy¹, Bui Doan Cuong¹, D. A. Gorski³, S. A. Zolotoy³, Nguyen Lan Anh¹, Nguyen Minh Ngoc¹,
I. B. Strashko³, Hồ Vũ Thu Giang², Chu Xuan Huy¹**

¹*Space Technology Institute of the Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam*

²*University of Security in Ho Chi Minh City, Ho Chi Minh City, Vietnam*

³*“Geoinformation Systems” SERUE of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

**STUDY ON PROCESS COORDINATION CAPABILITY FOR EARTH SURFACE IMAGING VIA VNREDSAT-1
OF VIETNAM AND BKA OF BELARUS**

Abstract. Leading companies in the field of obtaining data from Earth remote sensing from space are building Satellite constellations to increase the frequency (multiplicity) and monitor various parts of the Earth's surface. The Satellite constellation remote sensing equipment from Airbus (France) allows daily observation of any point on the Earth's surface with high

spatial resolution, and the grouping of DigitalGlobe (USA) – with ultra-high spatial resolution. The analysis of the mutual exploitation of the national space systems of the Socialist Republic of Vietnam and the Republic of Belarus has been carried out. There have been analyzed the joint capabilities of VNREDSat-1 (Vietnam) and BKA (Belarus) Earth Observation Systems for the monitoring of natural resources, the environment and natural disasters by comparison of their space and temporal characteristics (orbit parameters and re-visit time) as well as spectral-energetic characteristics (space, spectral and radiometric resolutions). The accepted correlation of technical parameters for solving the previously mentioned tasks having into account the different phases of the mentioned satellites has been determined. The conclusions have been reinforced by the results of live experiments with archival and instant data from both EO satellites.

Keywords: Space vehicle (SV), satellite, Vietnamese satellite (VNREDSat-1), Belarussian satellite (BKA), Earth Observation (EO)

For citation. Bui Quang Huy, Bui Doan Cuong, Gorski D. A., Zolotoy S. A., Nguyen Lan Anh, Nguyen Minh Ngoc, Strashko I. B., Hồ Vũ Thu Giang, Chu Xuan Huy. Study on process coordination capability for Earth surface imaging VIA VNREDSat-1 of Vietnam and BKA of Belarus. *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. 1, pp. 119–128 (in Russian).

Введение. Координация наблюдений поверхности Земли с помощью нескольких космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является одной из современных тенденций развития космических исследований. Практическая реализация такого подхода способствует существенному сокращению периодов наблюдения контролируемых регионов Земли, а также более эффективному использованию возможностей КА различных стран для ликвидации последствий природных и техногенных бедствий.

Большинство спутников ДЗЗ малого класса (типа ALSAT-2, SSOT, «Канопус-В» № 1, Белорусский космический аппарат (БКА), VNREDSat-1 и др.) создавались и запускались с целью получения космических снимков высокого оптического качества при минимизации интервалов времени повторной съемки одних и тех же участков поверхности Земли. Тем не менее, несмотря на успешную реализацию необходимых для этого сложных и гибких систем управления космическими аппаратами, зоны покрытия территории Земли отдельным спутником остаются по-прежнему весьма ограниченными.

Одним из способов преодоления данного ограничения может стать согласование функциональных возможностей КА ДЗЗ, принадлежащих различным странам. Так, в 2014 г. Институтом космических технологий Вьетнамской академии наук и технологий проводилось изучение возможности координации выполнения съемок спутниками VNREDSat-1 (Вьетнам) и THAICHOTE (Таиланд) [1]. При этом был сделан вывод, что практическая результативность координации их работы при оперативном получении данных ДЗЗ вполне удовлетворительна.

В настоящей статье представлены результаты исследования возможностей координации работы вьетнамского (VNREDSat-1) и белорусского (БКА) космических аппаратов при совместном проведении съемочного процесса поверхности Земли.

Орбитальные характеристики космических аппаратов. Оба рассматриваемых КА ДЗЗ имеют относительно низкие орбиты солнечно-синхронного типа (рис. 1), основные характеристики которых представлены в табл. 1 [2, 3]. Установленная на них оптическая съемочная аппаратура обеспечивает получение изображений поверхности Земли высокого разрешения [3, 4].

Цикличность траекторий обоих спутников показана на рис. 2 в виде проекций их орбит на поверхность Земли.

Однако, несмотря на близкие значения наклонов орбит спутников, их существенное различие заключается в фазах съемочного процесса: для VNREDSat-1 она является нисходящей, для БКА – восходящей. По этой причине полосы съемки КА ориентированы в противоположных направлениях (рис. 3), что приводит к ограничению числа их пересечений и уменьшению консолидированной площади изображений (рис. 4).

В условиях съемки в надир цикличность составляет 29 сут для VNREDSat-1 и 16 сут для БКА [2, 3] (см. рис. 2, а, б). Координация работы обоих спутников дает возможность сократить цикличность съемки, а также уменьшить геометрические искажения изображений за счет ее выполнения вблизи надира. Однако доступное для проведения съемки время будет при этом уменьшаться.

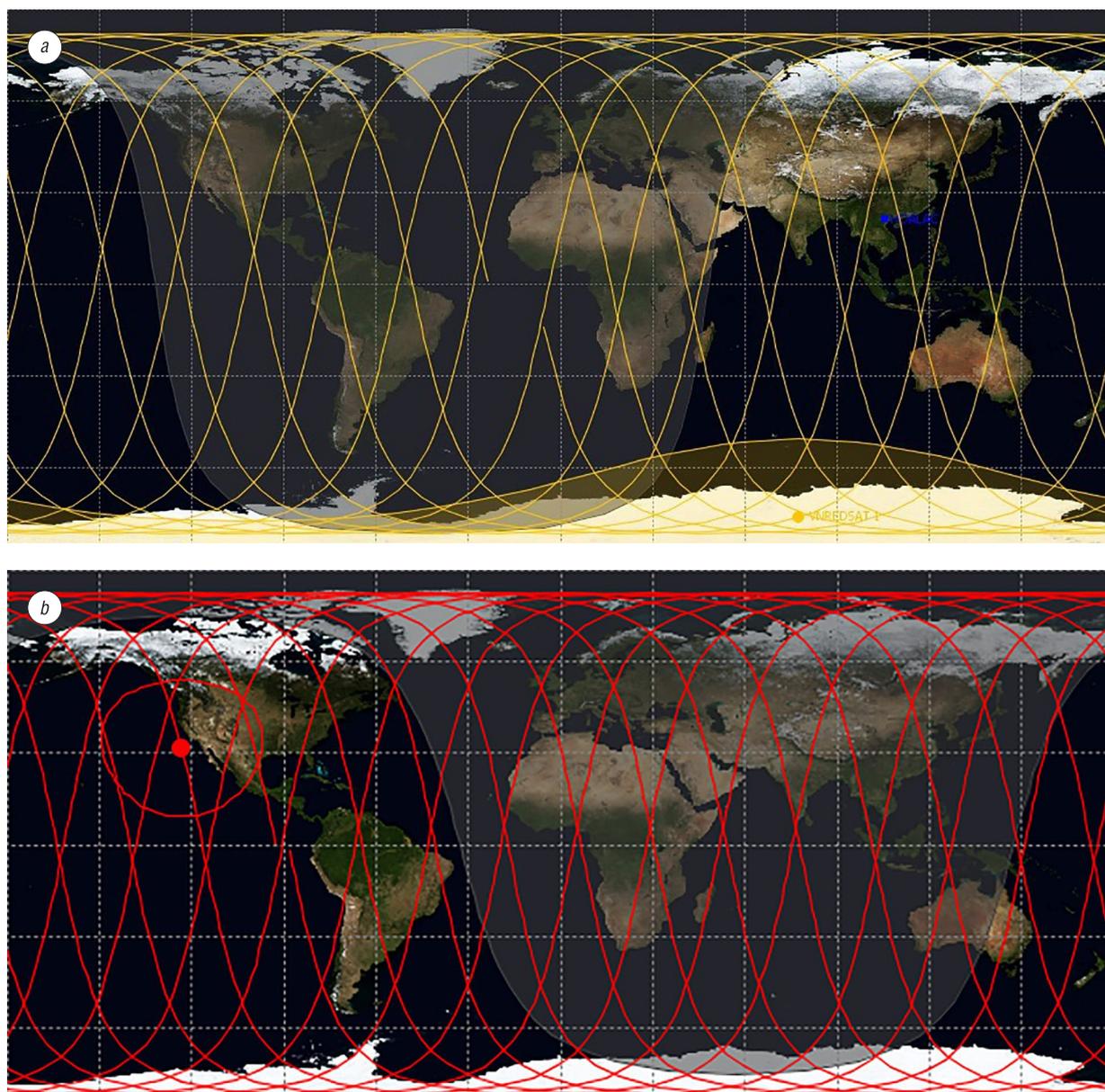


Рис. 1. Количество оборотов спутников VNREDSat-1 (a) и БКА (b) вокруг Земли в течение суток
 Fig. 1. Quantity orbital passes of VNREDSat-1 (a) and BKA (b) around the Earth per day

Таблица 1. Орбитальные характеристики КА VNREDSat-1 (Вьетнам) и БКА (Беларусь)
 Table 1. VNREDSat-1 (Vietnam) and BKA (Belarus) orbit parameters

Параметр орбиты	Спутник	
	VNREDSat-1	БКА
Тип	Солнечно-синхронная	Солнечно-синхронная
Высота, км	680	510
Наклонение, угл. град	98,1	97,5
Период вращения, мин	98,4	94,7
Число оборотов за сутки	14 + (18/29)	15 + (3/16)
Местное время	10 ч 30 мин	11 ч 27 мин
Цикличность, сут	29	16
Большая полуось	7058,907	6891,224
Эксцентриситет	0,00121	0,00135
Фаза съемки	Нисходящая ветвь	Восходящая ветвь

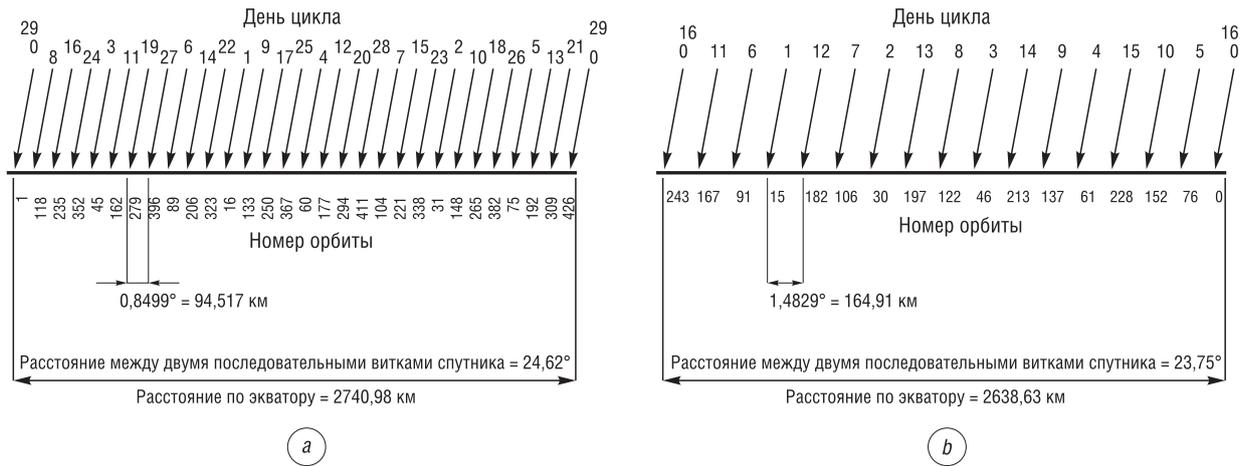


Рис. 2. Проекции орбит спутников VNREDSat-1 (a) и БКА (b)
 Fig. 2. Orbit projections of VNREDSat-1 (a) and BKA (b)

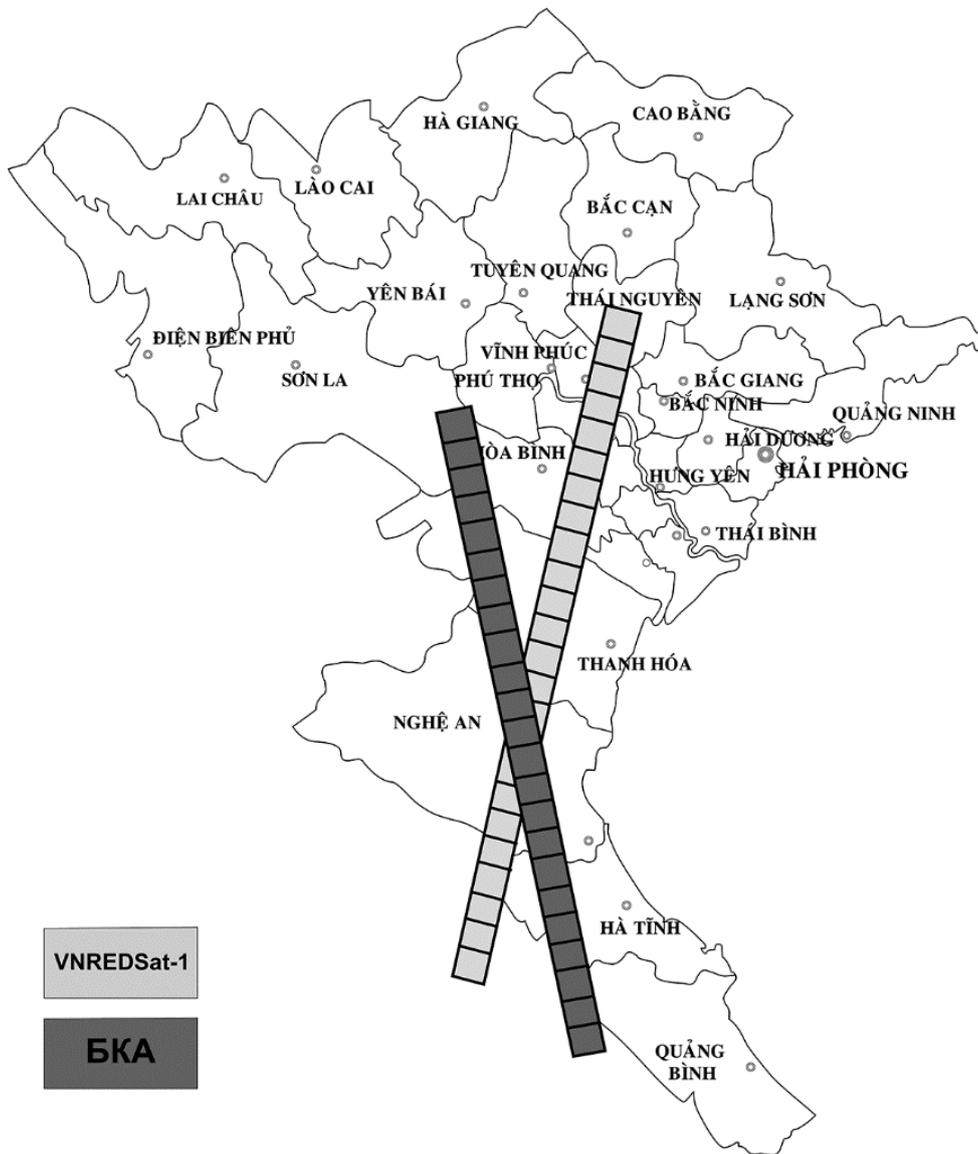


Рис. 3. Фазы съемки спутников VNREDSat-1 и БКА
 Fig. 3. VNREDSat-1 and BKA imaging phases

При максимальном крене 35° для VNREDSat-1 [3] и 40° для БКА [4] цикличность съемки в районе экватора может составить соответственно 15 и 13 ч. В этом случае координация работы спутников может обеспечить практически ежедневное получение снимков выбранных зон поверхности Земли.

В реальных условиях функционирования КА ДЗЗ величина крена составляет до 10° – 15° . При этом консолидированная площадь регистрируемых изображений может достигать 288 км^2 , что эквивалентно 94 % ($306,25 \text{ км}^2$) площади снимка VNREDSat-1 или 72 % (400 км^2) площади снимка БКА. На практике для улучшения эффективности координации съемочного процесса по времени (T) целесообразно выбирать максимально допустимый для решаемой задачи крен. Возможные варианты реализации режимов повторной съемки показаны на рис. 5.

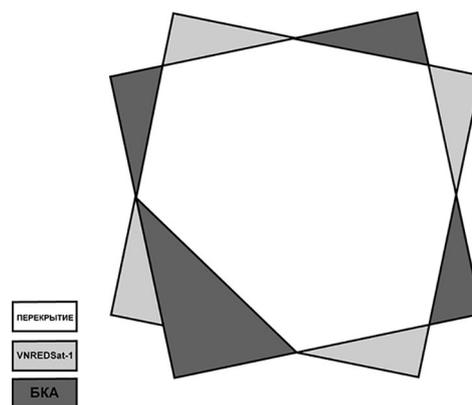


Рис. 4. Области перекрытия изображений, регистрируемых спутниками VNREDSat-1 и БКА

Fig. 4. Images overlapping areas registered by VNREDSat-1 and BKA



Рис. 5. Варианты повторной съемки космическими аппаратами VNREDSat-1 и БКА

Fig. 5. VNREDSat-1 and BKA repeated imaging options

Таким образом, орбитальное расположение космических аппаратов VNREDSat-1 и БКА предоставляет возможность координации съемочного процесса и не препятствует их согласованному функционированию. При этом наиболее значимым обстоятельством, обусловленным различием фаз съемки, ведущим к ограничению покрытия земной поверхности обеими полосами захвата и требующим обязательного учета, является согласованность крена КА ДЗЗ.

Спектрально-энергетические характеристики целевой аппаратуры. Степень практической значимости космических снимков определяется не только пространственно-временным разрешением, зависящим от орбитального движения каждого КА. Важную роль в возможности консолидации получаемых с помощью аппаратов изображений поверхности Земли играет также согласованность их пространственного (геометрического), спектрального (цветового) и энергетического (радиометрического) разрешений, обеспечиваемых бортовой оптической (целевой) аппаратурой. В табл. 2 представлены значения этих характеристик, реализованные в КА VNREDSat-1 и БКА [2, 3].

Т а б л и ц а 2. Характеристики целевой аппаратуры КА ДЗЗ VNREDSat-1 и БКА

Table 2. Characteristics of VNREDSat-1 and BKA imaging systems

Техническая характеристика	VNREDSat-1	БКА
Ширина полосы захвата, км	17,5 (ПС) 17,5 (МС)	23 (ПС) 20 (МС)
Пространственное разрешение, м	2,5 (ПС) 10,0 (МС)	2,1 (ПС) 10,5 (МС)
Спектральное разрешение, мкм	1 ПХ канал (0,45–0,75). 4 МС канала: синий (0,45–0,52), зеленый (0,53–0,60), красный (0,62–0,69), ближний ИК (0,76–0,89)	1 ПХ канал (0,54–0,86). 4 МС канала: синий (0,46–0,52); зеленый (0,51–0,60); красный (0,63–0,69); ближний ИК (0,75–0,84).
Радиометрическое разрешение, бит	12	8
Возможность получения стереопары	Имеется	Имеется

П р и м е ч а н и е: ПС – панхроматическая система, МС – мультиспектральная система, ИК – инфракрасный канал.

Анализ пространственного разрешения целевой аппаратуры КА VNREDSat-1 и БКА осуществлялся с использованием экспериментальных данных. Сопоставлялось качество снимков одной и той же территории поверхности Земли, зарегистрированных целевой аппаратурой каждым из спутников (рис. 6). В качестве базовых для сравнения использовались панхроматические изображения, полученные спутником VNREDSat-1. Эксперименты проводились в Юго-Восточном регионе Вьетнама (территория города Хошимин). Условия съемки представлены в табл. 3, а реальные маршруты съемок – на рис. 7.

Т а б л и ц а 3. Условия съемки территории г. Хошимин (Вьетнам) спутниками VNREDSat-1 и БКА

Table 3. Imaging conditions for Ho Chi Minh City (Vietnam) from VNREDSat-1 and BKA

Характеристика данных	VNREDSat-1	БКА
Дата съемки	30.01.2014	15.03.2016
Время UTC, час.мин	03.43	04.36
Крен, угл. град	7,8	8,2

В результате визуального анализа качества снимков был сделан вывод, что по параметрам пространственного разрешения работа обоих КА ДЗЗ может быть успешно скоординирована.

В отношении спектрального разрешения целевой аппаратуры следует особо подчеркнуть равное количество оптических информационных каналов и их весьма близкие спектральные

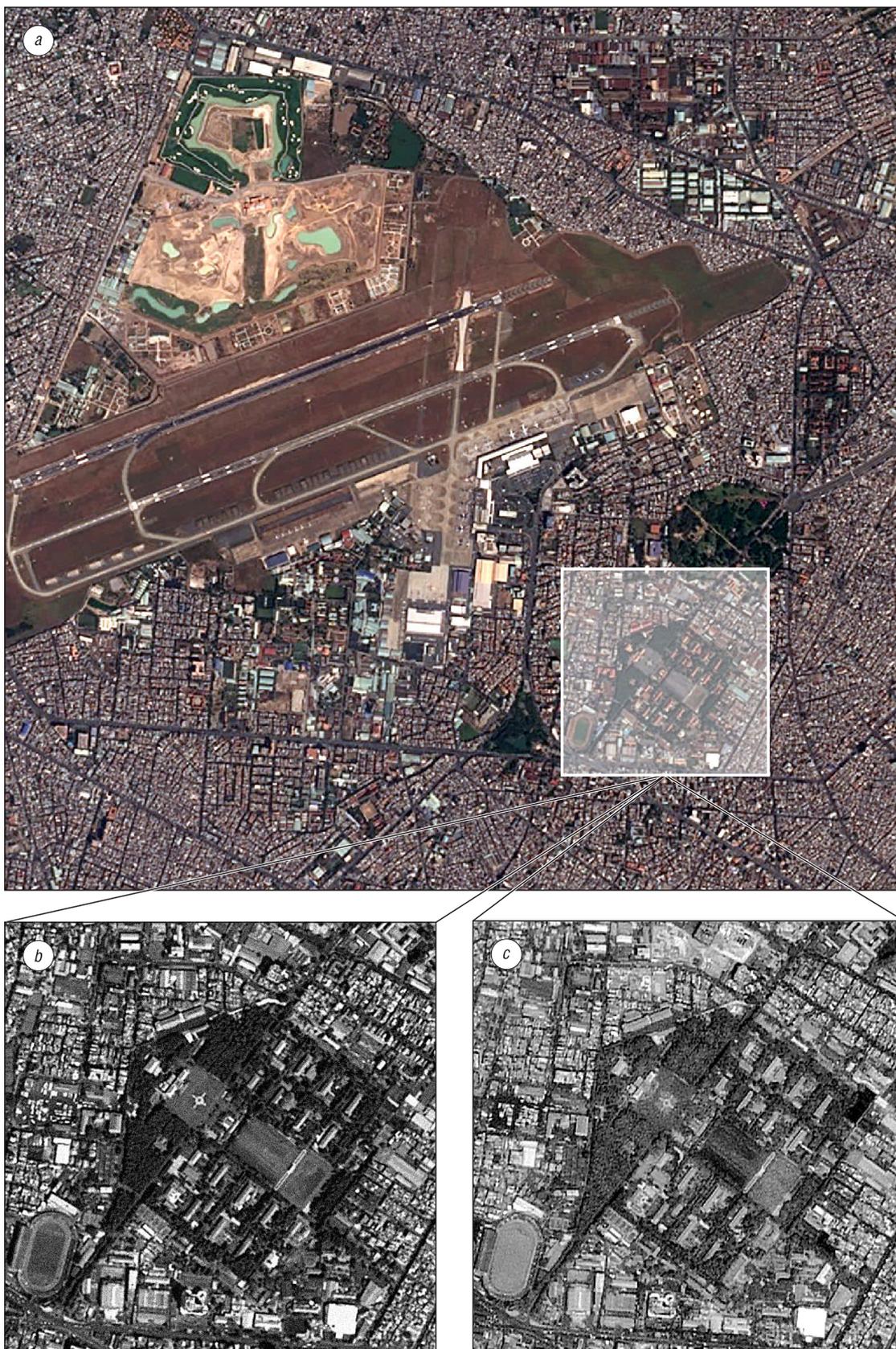


Рис. 6. Примеры космических снимков спутников VNREDSat-1 и БКА: *a* – зона съемки, *b* – изображение с космического аппарата VNREDSat-1, *c* – изображение с космического аппарата БКА

Fig. 6. VNREDSat-1 and BKA images samples: *a* – survey Area, *b* – image from spacecraft VNREDSat-1, *c* – image from spacecraft BKA

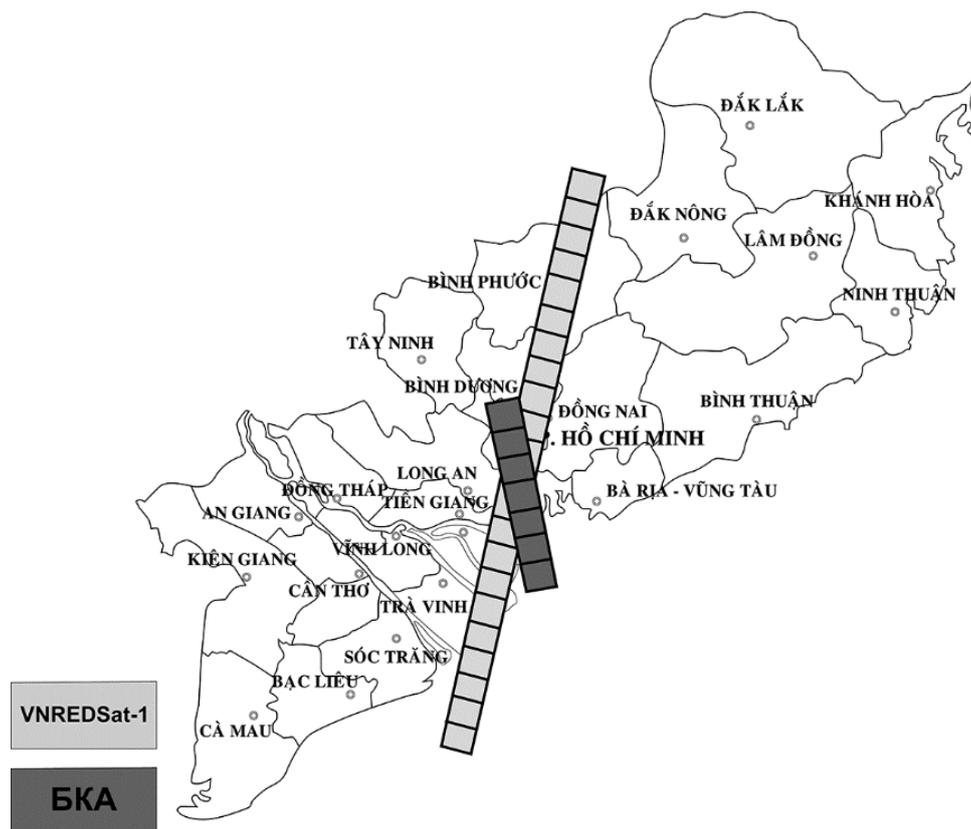


Рис. 7. Маршруты съемки территории г. Хошимин (Вьетнам) спутниками VNREDSat-1 и БКА

Fig. 7. VNREDSat-1 and BKA flight strips over Ho Chi Minh City (Vietnam)

характеристики (см. табл. 2). Это свидетельствует о возможности достижения исключительно высокой степени координации обоих спутников по данному параметру. Небольшие вариации спектрального состава регистрируемого излучения принципиального значения не имеют, особенно при решении заявленных практических задач (мониторинг природных ресурсов, окружающей среды и стихийных бедствий), и могут не приниматься во внимание.

Величина радиометрического разрешения целевой аппаратуры, характеризующая точность регистрации амплитуд принимаемых оптических сигналов, способствует распознаванию наземных объектов, различающихся своей яркостью. По нашим многолетним наблюдениям, для подавляющего большинства подобных задач радиометрическое разрешение укладывается в диапазон 6–11 бит. Представленные в табл. 2 значения данного параметра характеризуют потенциальные возможности бортового оборудования каждого из рассматриваемых спутников и пригодны для совместного решения указанных в данной статье практических задач. В этой связи возможность координации работы спутников VNREDSat-1 и БКА по данному параметру сомнений не вызывает.

В целом спутники ДЗЗ VNREDSat-1 и БКА обладают весьма высокой степенью корреляции своих орбитальных и аппаратурных характеристик. Все это способствует их успешной координации при решении задач мониторинга природных ресурсов, окружающей среды и стихийных бедствий.

Заключение. Путем сопоставления орбитальных характеристик и параметров целевой аппаратуры спутников ДЗЗ VNREDSat-1 и БКА выявлена возможность координации режимов их эксплуатации в интересах улучшения мониторинга природных ресурсов, окружающей среды и стихийных бедствий. При этом может быть существенно увеличена цикличность съемки выбранных зон поверхности Земли с одновременным сохранением качества регистрируемых изображений. Фактором, требующим особого внимания, является различие фаз съемки обоих КА.

Благодарности

Работа выполнена в соответствии с «Дорожной картой» развития сотрудничества между Национальной академией наук Беларуси и Вьетнамской академией наук и технологий на 2016–2020 годы (п. 22) и Меморандумом о взаимопонимании между Институтом космических технологий Вьетнамской академии наук и технологий и Научно-инженерным республиканским унитарным предприятием «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси «О сотрудничестве по эффективному использованию космических систем VNREDSat-1 и БКА» от 19–21 апреля 2016 г.

Авторы выражают благодарность Департаменту Международного сотрудничества Вьетнамской академии наук и технологий, одоббившему проект «VAST.HTQT.Belarus.04/16-17».

Acknowledgements

The work has been executed according to the established “Roadmap” for the development of cooperation between the National Academy of Sciences of Belarus and the Vietnam Academy of Science and Technology for 2016–2020 (Clause 22) and the Memorandum of Understanding between the Space Technology Institute of the Vietnam Academy of Science and Technology and “Geoinformation Systems” Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise of the National Academy of Sciences of Belarus on the “Study on joint-exploitation of the two systems VNREDSat-1 of Vietnam and BKA of Belarus” dated of April 19–21, 2016.

The authors herein express their gratitude to the Department of International Cooperation of the Vietnam Academy of Science and Technology, which approved the “VAST.HTQT.Belarus.04/16-17” project.

Список использованных источников

1. Координация деятельности между спутниками наблюдений Земли VNREDSat-1 (Вьетнам) и Thaichote (Таиланд) [Электронный ресурс] // Вьетнамская академия наук и технологий. – Режим доступа: <http://www.vast.ac.vn/tin-tuc-su-kien/tin-vien/1904-hoi-thao-khoa-hoc-phoi-hop-hoat-dong-giua-hai-he-thong-ve-tinh-quan-sat-trai-dat-vnredsatsat-1-viet-nam-va-thaichote-thai-lan> – Дата доступа: 31.07.2017.
2. Белорусский космический аппарат (БКА) [Электронный ресурс] // УП «Геоинформационные системы». – Режим доступа: <http://gis.by/ru/tech/bka>. – Дата доступа: 31.07.2017.
3. VNREDSat-1 [Electronic Resource] // Earth Observation Portal. – Mode of access: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/vnredsatsat-1> – Date of access: 31.07.2017.
4. БКА (Belka-2) [Electronic Resource] // Gunter’s Space Page. – Mode of access: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/belka-2.htm – Date of access: 31.07.2017.

References

1. Coordination of VNREDSat-1 (Vietnam) and Thaichote (Thailand) Earth Observation satellite activities. The *Vietnam Academy of Science and Technology*. Available at: <http://www.vast.ac.vn/tin-tuc-su-kien/tin-vien/1904-hoi-thao-khoa-hoc-phoi-hop-hoat-dong-giua-hai-he-thong-ve-tinh-quan-sat-trai-dat-vnredsatsat-1-viet-nam-va-thaichote-thai-lan> (Accessed 31 July 2017).
2. Belarussian satellite (BKA). “*Geoinformation Systems*” UE. Available at: <http://gis.by/ru/tech/bka> (Accessed 31 July 2017).
3. VNREDSat-1. *Earth Observation Portal*. Available at: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/v-w-x-y-z/vnredsatsat-1> (Accessed 31 July 2017).
4. BKA. *Gunter’s Space Page*. Available at: http://space.skyrocket.de/doc_sdat/belka-2.htm (Accessed 31 July 2017).

Информация об авторах

Буй Доан Чанг – магистр, заведующий проектом «Исследование возможности координации процессов съемки поверхности Земли космическими аппаратами VNREDSat-1 (Вьетнам) и БКА (Беларусь)», заместитель директора, Институт космических технологий Вьетнамской академии наук и технологий (A22, ул. Хоанг Куок Вьет, 18, Ханой, Вьетнам). E-mail: bdcuong@sti.vast.vn

Буй Куанг Гуи – научный сотрудник отдела управления спутником, Институт космических технологий Вьетнамской академии наук и технологий (2Н, ул. Хоанг Куок Вьет, 18, Ханой, Вьетнам). E-mail: bqhuy@sti.vast.vn

Горский Дмитрий Александрович – заведующий отдела обработки данных ДЗЗ, Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dhorski@gis.by

Information about the authors

Bui Doan Cuong – Master degree, Head of project “Study on joint-exploitation of the two systems VNREDSat-1 of Viet Nam and BKA of Belarus”, Space Technology Institute of the Vietnam Academy of Science and Technology (A22 – 18 Hoang Quoc Viet Str., Hanoi, Vietnam). E-mail: bdcuong@sti.vast.vn

Bui Quang Huy – Researcher of Satellite Control Department, Space Technology Institute of the Vietnam Academy of Science and Technology (2H – 18 Hoang Quoc Viet Str., Hanoi, Vietnam). E-mail: bqhuy@sti.vast.vn

Dmitry A. Horski – Head of Department, Image Processing Department, Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise “Geoinformation Systems” of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dhorski@gis.by

Золотой Сергей Анатольевич – кандидат технических наук, директор, Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gis@gis.by

Нгуен Лан Ань – научный сотрудник отдела управления и эксплуатации спутниковых данных, Институт космических технологий Вьетнамской академии наук и технологий (2Н, ул. Хоанг Куок Вьет, 18, Ханой, Вьетнам). E-mail: nlanh@sti.vast.vn

Нгуен Минь Нгок – заместитель начальника отдела управления и эксплуатации спутниковых данных, Институт космических технологий Вьетнамской академии наук и технологий (2Н, ул. Хоанг Куок Вьет, 18, Ханой, Вьетнам). E-mail: nmngoc@sti.vast.vn

Страшко Игорь Болеславович – заместитель директора по производству, Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Геоинформационные системы» Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: istrashko@gis.by

Чу Ксан Гуи – начальник отдела управления и эксплуатации спутниковых данных, Институт космических технологий Вьетнамской академии наук и технологий (2Н, ул. Хоанг Куок Вьет, 18, Ханой, Вьетнам). E-mail: cxhuy@sti.vast.vn

Хо Ву Туу Джан – магистр, Университет безопасности в г. Хошимин (18 км, Лин Тюнг р-н, Туу Дюк обл., Хошимин, Вьетнам). E-mail: motsach50000@yahoo.com

Sergey A. Zolotoy – Ph. D. (Engineering), Director, Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise “Geoinformation Systems” of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gis@gis.by

Nguyen Lan Anh – Researcher of Management and Exploitation Satellite Image Data Department, Space Technology Institute of the Vietnam Academy of Science and Technology (2H –18 Hoang Quoc Viet Str., Hanoi, Vietnam). E-mail: nlanh@sti.vast.vn

Nguyen Minh Ngoc – Deputy of Management and Exploitation Satellite Image Data Department, Space Technology Institute of the Vietnam Academy of Science and Technology (2H – 18 Hoang Quoc Viet Str., Hanoi, Vietnam). E-mail: nmngoc@sti.vast.vn

Ihar B. Strashko – Deputy Director of Production, Scientific and Engineering Republican Unitary Enterprise “Geoinformation Systems” of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Sarganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: istrashko@gis.by

Chu Xuan Huy – Chief of Management and Exploitation Satellite Image Data Department, Space Technology Institute of the Vietnam Academy of Science and Technology (2H – 18 Hoang Quoc Viet Str., Hanoi, Vietnam). E-mail: cxhuy@sti.vast.vn

Hồ Vũ Thu Giang – Master degree, University of Security in Ho Chi Minh City (km 18, Linh Trung Ward, Thu Duc District, Ho Chi Minh City, Vietnam). E-mail: motsach50000@yahoo.com