

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2020. Т. 65, № 1

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2020. Т. 65, № 1

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

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

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

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

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

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

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

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

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

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

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

*Адрес редакции:
ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 284-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2020. Т. 65, № 1

Выходит на русском, белорусском и английском языках

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

Подписано в печать 24.03.2020. Выход в свет 30.03.2020. Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 80 экз. Заказ 55.
Цена номера: индивидуальная подписка – 12,26 руб., ведомственная подписка – 29,23 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/18 от 02.08.2013. ЛП № 02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220141, г. Минск, Республика Беларусь

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

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2020, vol. 65, no. 1

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

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

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

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

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

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

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

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

Irina A. Starostsina (lead editor)

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

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

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

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

Alexander F. Ilyuschenko – State Scientific and Production Association of Powder Metallurgy – Academician
O. V. Roman Institute of Powder Metallurgy, Minsk, Belarus

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

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

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

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

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

Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Valeri M. Fedosyuk – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus
Mikhail L. Kheifetz – Open Joint Stock Company “NPO Center” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

E d i t o r i a l C o u n c i l

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

*Address of the Editorial Office:
1, Akademicheskaya Str., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.
Tel.: +375 17 284-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2020, vol. 65, no. 1

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

It is sent of the press 24.03.2020. Appearance 30.03.2020. Format 60×84 1/8. Offset paper. The press digital.

Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 80 copies. Order 55.

Number price: individual subscription – 12,26 byn., departmental subscription – 29,23 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise “Publishing House “Belaruskaya Navuka”

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

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

СОДЕРЖАНИЕ**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

Хина Б. Б., Клубович В. В., Кулак М. М. Механизм влияния ультразвука на процессы горения и структурообразования при СВС в системах на основе титана	7
Вечер А. К., Говор Г. А., Янушкевич К. И., Бердиев У. Т., Хасанов Ф. Ф. Исследование влияния условий синтеза на магнитные характеристики композиционных материалов на основе порошков железа	17
Грабчиков С. С., Грабчикова Е. А., Васин Д. С., Тишкевич Д. И., Ластовский С. Б., Якушевич А. С., Богатырев Ю. В., Калагин И. В., Митрофанов С. В. Моделирование пробегов и потерь энергии высокоэнергетических ионов в однослойных и многослойных материалах	25
Волочко А. Т., Зеленин В. А., Мельник Н. Ю. Сплавы системы Cr–Ni–Si для получения резистивных элементов интегральных микросхем методом магнетронного распыления	35
Дьячкова Л. Н. Особенности формирования структуры и свойств порошковых сталей с добавками, активизирующими диффузионные процессы при спекании	43
Веера И. И., Зизико А. В., Цыкунов П. Ю., Якович В. М. Особенности технологии нагрева при индукционной термообработке внешним электромагнитным полем	54

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Прушак В. Я., Дворник А. П. Методика расчета двухбарабанной шахтной подъемной машины	62
---	----

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Мельникова Г. Б., Лапицкая В. А., Кузнецова Т. А., Толстая Т. Н., Чижик С. А., Котов Д. А. Влияние воздействия низкотемпературной плазмы атмосферного барьерного разряда на структуру и свойства мембран эритроцитов и тромбоцитов	72
Менжинский А. Б., Малашин А. Н. Имитационная модель «свободнопоршневой двигатель – электро-механотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения»	83

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Лагунович Н. Л. Оптимизация конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки мощного <i>n</i> -канального ДМОП-транзистора	97
Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Сорока С. А. Влияние параметров оптического излучения на амплитудные характеристики кремниевых фотоэлектронных умножителей	104

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Решетняк А. В., Дравица В. И. Комплексное использование технологий идентификации и распределенных реестров для развития электронных услуг на основе многофункциональных интеллектуальных документов	110
Кругликов С. В., Зализко А. Ю. Синтез беспроводной телекоммуникационной сети с адаптацией к отказам узловых элементов средней и высокой интенсивности	117

CONTENTS

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

Khina B. B., Klubovich V. V., Kulak M. M. Mechanism of the ultrasound influence on combustion and structure formation at SHS in titanium-base systems	7
Vetcher A. K., Govor G. A., Yanushkevich K. I., Berdiev U. T., Khasanov F. F. Study of the influence of conditions of synthesis on magnetic characteristics of composite materials based on iron powders	17
Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Vasin D. S., Tishkevich D. I., Lastovskii S. B., Yakushevich A. S., Bogatyrev Y. V., Kalagin I. V., Mitrofanov S. V. Modeling of paths and energy losses of high-energy ions in single-layered and multilayered materials	25
Volochko A. T., Zelenin V. A., Melnik N. Yu. Alloys of the Cr–Ni–Si system for obtaining resistive elements of integrated microcircuits by magnetron sputtering	35
Dyachkova L. N. Features of the formation of the structure and properties of powder steels with additives that activate diffusion processes during sintering	43
Vegea I. I., Zizika A. V., Tsykunou P. Y., Yakovich V. M. Features of heating technology at induction thermal processing with external electromagnetic field	54

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

Prushak V. Ya., Dvornik A. P. Method for calculating a two-drum mine winder	62
--	----

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

Melnikova G. B., Lapitskaya V. A., Kuznetsova T. A., Tolstaya T. N., Chizhik S. A., Kotov D. A. Influence of the low-temperature plasma of the atmospheric barrier discharge on the structure and properties of the membranes erythrocytes and platelets	72
Menzhinsky A. B., Malashin A. N. Simulation model “free-piston engine – electromechatronic converter on the basis of an electrical generator reciprocating”	83

RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKING

Lagunovich N. L. Optimization of guard rings construction and epitaxial film resistivity of power <i>n</i> -channel DMOS-transistor	97
Asayonak M. A., Zenevich A. O., Novikau Ya. V., Saroca S. A. Influence of optical radiation parameters on the amplitude characteristics of silicon photoelectron multipliers	104

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Reshetniak A. V., Dravitsa V. I. Comprehensive use of identification technologies and distributed ledger technology for the development of electronic services provided through multi-purpose smart documents	110
Kruglikov S. V., Zalizka A. Yu. Synthesis of wireless telecommunication network with adaptation to refusals of central elements of average and high intensity	117

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

УДК 536.46:534.29
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-7-16>

Поступила в редакцию 20.02.2020
Received 20.02.2020

Б. Б. Хина^{1,2}, В. В. Клубович^{1,3}, М. М. Кулак⁴

¹Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь

³Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

⁴Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Республика Беларусь

МЕХАНИЗМ ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОЦЕССЫ ГОРЕНИЯ И СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ПРИ СВС В СИСТЕМАХ НА ОСНОВЕ ТИТАНА

Аннотация. На разработанной экспериментальной установке исследовано влияние ультразвуковых колебаний (УЗК) на температуру и скорость горения при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе (СВС) в системах Ti–C, Ti–C–Ni–Mo, Ti–B. На основании анализа существующих литературных данных и собственных измерений разработано теоретическое объяснение полученных результатов. Установлено влияние интенсивности ультразвуковых колебаний на состав и структуру конечных продуктов синтеза. Получено, что наряду с изменением параметров волны горения увеличивается полнота взаимодействия и происходит изменение микроstructures и фазового состава продуктов реакции. Предложена концепция разделения влияния УЗК на СВС на тепловое (макроскопическое), связанное с вынужденной конвекцией газа вокруг осциллирующего образца, которая приводит к снижению температуры и скорости горения, и микроскопическое (нетепловое) воздействие, связанное с изменением условий растекания расплава, протекания гетерогенных реакций и массопереноса в жидкой фазе в высокотемпературной зоне волны СВС, что приводит к изменению фазового состава и структуры конечного продукта.

Ключевые слова: самораспространяющийся высокотемпературный синтез (СВС), ультразвуковые колебания (УЗК), зоны волны горения карбиды, бориды титана, фазовый состав

Для цитирования: Хина, Б. Б. Механизм влияния ультразвука на процессы горения и структурообразования при СВС в системах на основе титана / Б. Б. Хина, В. В. Клубович, М. М. Кулак // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 7–16. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-7-16>

Boris B. Khina^{1,2}, Vladimir V. Klubovich^{1,3}, Michail M. Kulak⁴

¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Academy of Aviation, Minsk, Republic of Belarus

³Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

⁴Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus, Vitebsk, Republic of Belarus

MECHANISM OF THE ULTRASOUND INFLUENCE ON COMBUSTION AND STRUCTURE FORMATION AT SHS IN TITANIUM-BASE SYSTEMS

Abstract. Using the developed experimental setup, the effect of ultrasonic oscillations (USO) on the temperature and combustion velocity during self-propagating high-temperature synthesis (SHS) in the Ti–C, Ti–C–Ni–Mo and Ti–B systems is studied. Basing on the analysis of data known in literature and our own measurements, theoretical explanation to the observed results is proposed. The effect of the intensity of ultrasonic oscillations on the composition and structure of the final synthesis products is established. It was found that along with changes in the parameters of the combustion wave, the completeness of the interaction increases, and changes in the microstructure and phase composition of the reaction products occur. The concept of separation of the effect of USO on SHS into thermal, or macroscopic, and non-thermal, or microscopic

is proposed. The former is associated with forced convection of gas around an oscillating specimen and leads to a decrease in temperature and combustion velocity. The latter is connected with a change in the melt spreading conditions, the progress of heterogeneous reactions and mass transfer in the liquid phase in the high-temperature zone of the SHS wave, which lead to a change in the phase composition and structure of the final product.

Keywords: self-propagating high-temperature synthesis (SHS), ultrasonic oscillations (USO), combustion wave zones, titanium carbides, borides, phase composition

For citation: Khina B. B., Klubovich V. V., Kulak M. M. Mechanism of the ultrasound influence on combustion and structure formation at SHS in titanium-base systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 7–16 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-7-16>

Введение. Научно-технический прогресс требует создания не только новых материалов с широким комплексом разнообразных свойств, но и высокоэффективных технологий их производства. Одним из перспективных способов получения таких материалов является метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), который обладает целым рядом преимуществ. СВС не только выдвинул технологические задачи, например использование процессов безгазового горения для получения материалов и соединений, но и стимулировал интенсивное развитие работ по теоретическому и экспериментальному исследованию механизма горения гетерогенных конденсированных систем.

Важнейшим направлением развития СВС является поиск эффективных путей управления процессом с целью получения материалов и изделий с заданными структурой, фазовым составом и свойствами. Согласно положениям синергетики, для системы, находящейся в неравновесном состоянии, даже слабое воздействие может существенно изменить ее состояние. Эффективным способом воздействия является использование физических полей, например, мощных ультразвуковых колебаний (УЗК) и центробежных сил. Задача расшифровки механизма горения и понимания процесса формирования конечных целевых продуктов в волне горения гетерогенных систем с наложением интенсивных ультразвуковых колебаний представляет большой научный и практический интерес. Результаты этих исследований являются основой для успешного регулирования процессов создания материалов с заданными свойствами методом СВС в УЗ-поле.

Для изменения температуры горения T_f и условий гетерогенного взаимодействия в волне СВС обычно меняют химический состав исходной шихты или проводят ее дополнительную обработку, например: а) разбавление инертным веществом для снижения T_f ; б) введение реагентов, обеспечивающих дополнительные экзотермические реакции (повышение T_f); в) добавление небольших количеств летучих добавок-активаторов, которые инициируют газотранспортные процессы в волне горения; г) подогрев шихты, то есть внесение дополнительной энтальпии в зону реакции; д) механоактивация порошковой смеси в высокоэнергонагруженной шаровой мельнице, что уменьшает характерный размер реагентов, повышает площадь контакта и создает большое количество дефектов в их кристаллической структуре; е) наложение УЗК.

В имеющихся работах по исследованию влияния ультразвуковых колебаний на процесс горения гетерогенных систем нет модели, которая объясняет изменение температуры и скорости горения при СВС с ультразвуком.

Поэтому целью данной работы является разработка модели, объясняющей полученные результаты.

Теоретическое обоснование. При малых числах Рейнольдса коэффициент теплообмена α пропорционален скорости обтекания газом конденсированной фазы. Можно записать, что

$$\alpha \sim v, \quad (1)$$

где v – скорость относительного движения фаз (конденсированной и газообразной), м/с. Чем больше скорость v , тем больше коэффициент теплообмена.

В задачах акустики максимальная скорость относительного движения конденсированной фазы v может быть записана в следующем виде:

$$v = 2\pi fA, \quad (2)$$

где f – частота, Гц; A – амплитуда смещения, мкм. В частности, для $f = 18$ кГц, $A = 10$ мкм имеем, что $v = 1,13$ м/с. Для исследуемых нами систем и таких скоростей v число Рейнольдса $Re \sim 1000$.

Комбинируя выражения (1) и (2), получаем, что коэффициент теплообмена зависит от произведения

$$\alpha \sim \nu A. \quad (3)$$

Таким образом, выражение (3) хорошо коррелирует с экспериментальными данными: при увеличении амплитуды колебаний линейно падает температура.

Рассмотрим характерное время τ для охлаждения объекта диаметром d :

$$\tau = \frac{d^2}{4\mu_0^2 a}. \quad (4)$$

Здесь a – коэффициент температуропроводности смеси реагирующих порошков; $\mu_0 = 2,4048$ – первый корень функции Бесселя нулевого порядка [1]; $a = \lambda/(\rho c_p)$, где λ – теплопроводность, ρ – плотность, c_p – теплоемкость. Для титана $\lambda = 23,5$ Вт/(м·К) при 1135 К [2], $\rho = 4,35 \cdot 10^3$ кг/м³ (α -Ti) при 1143 К [2], $c_p = 0,617$ кДж/(кг·К) при 1023 К [3]. Тогда $a \approx 8,8 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

Из выражения (4) для титана с $d = 20$ мм имеем $\tau = 2$ с. Эта величина представляет собой характерное время выравнивания температуры по радиусу цилиндрического образца, то есть может рассматриваться как верхняя оценка влияния «теплового» фактора.

Характерным временем t_x для процессов горения является время прохождения волной горения зоны прогрева (зоны Михельсона). Ширина зоны Михельсона $L \sim a/U$, где U – скорость горения, a – коэффициент температуропроводности; для спрессованного СВС-образца $a \sim 10^{-5}$ м²/с. Тогда $t_x = L/U$, или $t_x \sim a/U^2$. По экспериментальным данным для системы Ti–В при мольном соотношении Ti : В = 1 : 0,75 и амплитуде УЗК $\xi = 15$ мкм скорость горения составляла $U = 2$ см/с. Тогда $L = 500$ мкм и $t_x = 0,025$ с, что в 8 раз меньше, чем τ . При размере частиц Ti 50 мкм [4] в зону прогрева помещается ~10 частиц. Обычно ширина зоны быстрой реакции в волне СВС – всего несколько частиц [5].

Для СВС-процессов такая оценка величины t_x является заниженной, поскольку не учитывает наличие типичной для СВС широкой зоны догорания. В последней протекают постпроцессы с малым тепловыделением, которые определяют структуру продукта синтеза: а) коалесценция твердых частиц продукта, образовавшихся в зоне быстрой реакции за счет диффузии атомов через прослойки жидкой фазы между частицами; б) кристаллизация оставшегося расплава; в) твердофазное спекание зерен, которое обычно протекает не полностью.

При прохождении ультразвуковой волны по образцу происходит поглощение УЗ-энергии, что приводит к нагреву, однако скорость этого нагрева незначительна. При наложении УЗК коэффициент теплоотдачи с поверхности колеблющегося образца увеличивается, что обуславливает снижение скорости и температуры горения.

Отсюда следует вывод, что наибольшее влияние на температуру образца УЗК оказывают на стадии охлаждения, когда идет кристаллизация, формирование зерен и т. п. Это говорит о том, что роль теплового фактора существенна в основном в зоне догорания. Понижение температуры из-за вынужденной конвекции, вызванной осцилляциями образца, приводит к существенному снижению коэффициента диффузии, что замедляет коалесценцию (растворение мелких частиц и рост более крупных), что в обычных условиях обуславливает уменьшение общего числа частиц и увеличение их размера. В результате «выживает» существенно (на порядки) большее количество мелких зерен и не успевают вырасти более крупные [6]. Из закона сохранения массы следует, что в этом случае средний размер зерен продукта будет меньше, что и наблюдается экспериментально в данной работе. При этом чем выше скорость охлаждения расплава, тем сильнее должны проявляться эти кинетические эффекты: чем больше амплитуда колебаний и, соответственно, скорость охлаждения, тем меньше средний размер зерен и тем больше их кристаллическая структура может отличаться от равновесной [7–10]. В этом заключается один из аспектов влияния УЗК на структуру СВС-продукта.

Однако поскольку, как уже отмечено, значение τ является верхней оценкой, а t_x – нижней, то влияние теплового фактора может распространяться на все зоны волны СВС.

Как показано путем термодинамического (ТД) расчета на примере системы Ti–В [11], тепловыделение, необходимое для поддержания волны горения, происходит за счет образования

тугоплавких частиц TiB_2 и расплава $Ti-B$, обладающего отрицательной избыточной энтальпией смешения в узкой зоне высокотемпературной реакции. Причем зерна продукта кристаллизуются из расплава, что подтверждается ТД-расчетом – состав системы при адиабатической температуре T_{ad} находится между линиями ликвидус и солидус. Как известно из теории кристаллизации, в однокомпонентной системе переохлаждение расплава ΔT существенно изменяет условия образования твердой фазы: с увеличением ΔT скорость нуклеации возрастает, а скорость диффузионно-контролируемого роста зародышей уменьшается. В условиях СВС, когда зародыши твердого продукта образуются за счет химического взаимодействия в высокотемпературном расплаве, даже небольшое переохлаждение может оказывать сильное влияние на кинетику фазообразования. Поэтому тепловой фактор (макроуровень) может действовать и в зоне реакции, влияя на основное тепловыделение в волне СВС и тем самым на скорость горения.

Результаты и их обсуждение. Было исследовано влияние УЗК на распределение температуры по волне горения при СВС в четверной системе $Ti-C-Ni-Mo$. Для приготовления исходной шихты использовали порошки титана марки ПТМ с размером частиц до 100 мкм, никеля марки ПНК-2 дисперсностью 10 мкм и молибдена марки МПЧ (дисперсность 10 мкм), а также ламповую сажу ПМ-16Э с размером частиц менее 1 мкм. Цилиндрические образцы диаметром 20 мм и высотой 20–25 мм изготавливали методом глухого прессования. Степень прессования образцов подбирали таким образом, чтобы их относительная плотность обеспечивала максимальную скорость горения для изучаемых систем: 55–60 % от теоретической плотности. Для четверной системы $Ti-C-Ni-Mo$ использовали состав 85 % (80 % Ti + 20 % C) + 15 % (50 % Ni + 50 % Mo).

Синтез проводили на разработанной установке (полезная модель 4319 Респ. Беларусь: МПК (2006) В22F 3/00 «Установка для синтеза тугоплавких соединений», авторы – В.В. Клубович, М.М. Кулак, Л.Л. Платонов) при различной амплитуде УЗК (ξ). На рис. 1 приведены полученные результаты по изменению распределения температуры по волне горения для системы $Ti-C-Ni-Mo$ без ультразвука и при воздействии УЗК.

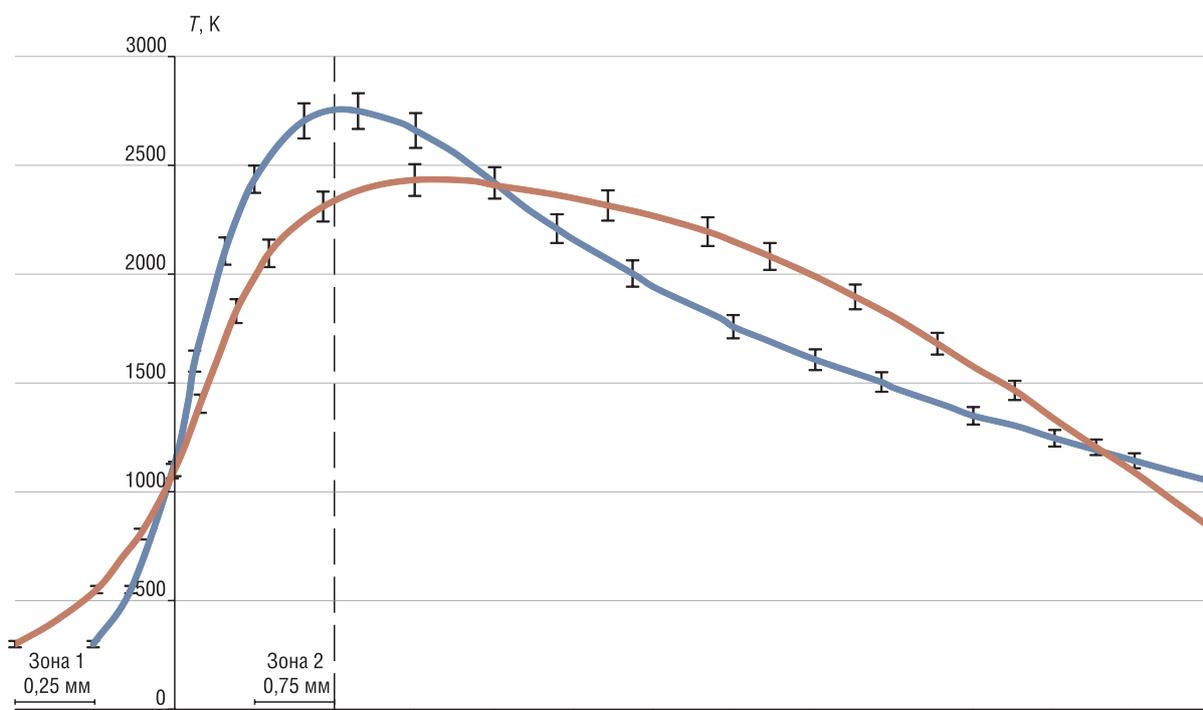


Рис. 1. Распределение температуры по волне горения для системы $Ti-C-Ni-Mo$ без ультразвукового воздействия (синий цвет) и при воздействии ультразвуковых колебаний $\xi = 3,5$ мкм (коричневый цвет)

Fig. 1. Temperature distribution over the combustion wave for the $Ti-C-Ni-Mo$ system without ultrasonic action (blue color) and with ultrasonic oscillations $\xi = 3.5$ μm (brown color)

Приведенные данные свидетельствуют о том, что в зависимости от величины воздействия происходит изменение распределения температуры по волне горения. При этом наблюдается расширение зоны прогрева примерно в 2–2,5 раза, зоны химического реагирования и высокотемпературной части зоны догорания, что указывает на существенное влияние ультразвуковых колебаний на перераспределение тепла в волне горения исследуемых систем, а тем самым на процесс протекания синтеза под действием ультразвуковых колебаний. Это может быть связано с нетепловым фактором – непосредственным воздействием УЗК на физико-химическое взаимодействие в волне СВС («микроуровень»). Макровоздействие связано с охлаждением поверхности образца из-за возникновения вынужденной конвекции окружающего газа, а микровоздействие – с влиянием УЗК на комплексные процессы взаимодействия в волне СВС (растекание расплава, гетерогенные реакции и массоперенос в жидкой фазе).

Был исследован фазовый состав продуктов синтеза. Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометрическом комплексе D8 ADVANCE фирмы BRUKER в $\text{CuK}\alpha$ -излучении. Точность определения параметров кристаллических решеток составляет три знака после запятой (четвертый знак не является точным). Такая относительно невысокая точность связана с невозможностью использования линий под большими углами 2Θ и, как правило, асимметричным искажением профиля дифракционной линии. Результаты фазового анализа продуктов синтеза в системах Ti-xC , Ti-C-Ni-Mo , Ti-xB (x – стехиометрический коэффициент) приведены на рис. 2–4.

Установлено существование взаимосвязи интенсивности ультразвуковых колебаний с составом и структурой конечных продуктов синтеза. Получено, что, несмотря на изменение параметров волны горения, полнота реакции увеличивается и происходит изменение микроструктуры и фазового состава продуктов реакции.

Ультразвук существенно ускоряет массоперенос компонентов в расплаве, интенсифицирует растекание инертного компонента по поверхности частиц карбида титана для системы Ti-C-Ni-Mo , что обеспечивает более равномерное распределение связки между зёрнами и повышает структурную однородность продуктов.

Видно, что наложение УЗК на СВС-процесс системы Ti-B при одном и том же соотношении компонентов x приводит к изменению соотношения фаз в продукте синтеза.

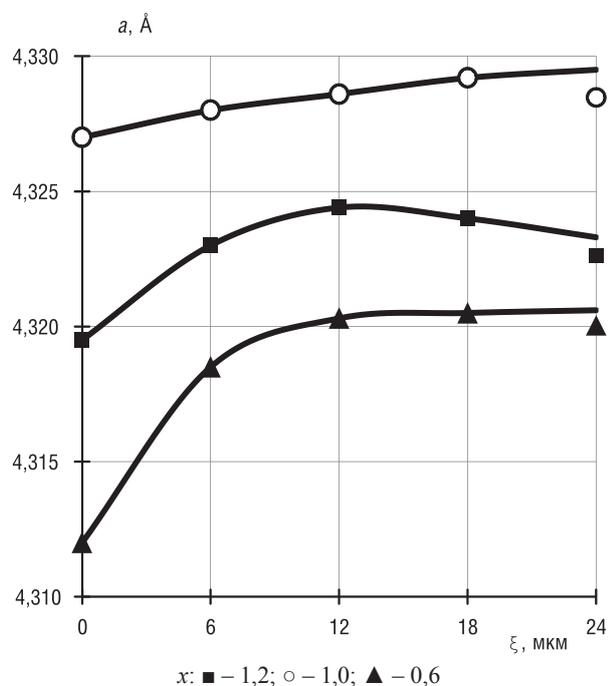


Рис. 2. Зависимость периода решетки карбида титана в системе Ti+xC от амплитуды ультразвуковых колебаний ξ

Fig. 2. Dependence of the lattice period of titanium carbide in the system Ti+xC on the amplitude of ultrasonic oscillations ξ

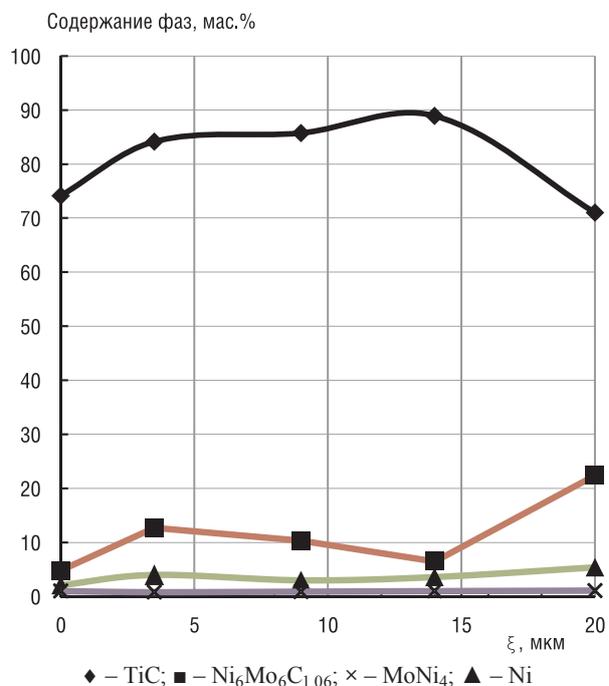


Рис. 3. Содержание синтезированных фаз в системе Ti-C-Ni-Mo в зависимости от амплитуды ультразвуковых колебаний ξ

Fig. 3. Content of synthesized phases in the system Ti-C-Ni-Mo vs. the amplitude of ultrasonic oscillations ξ

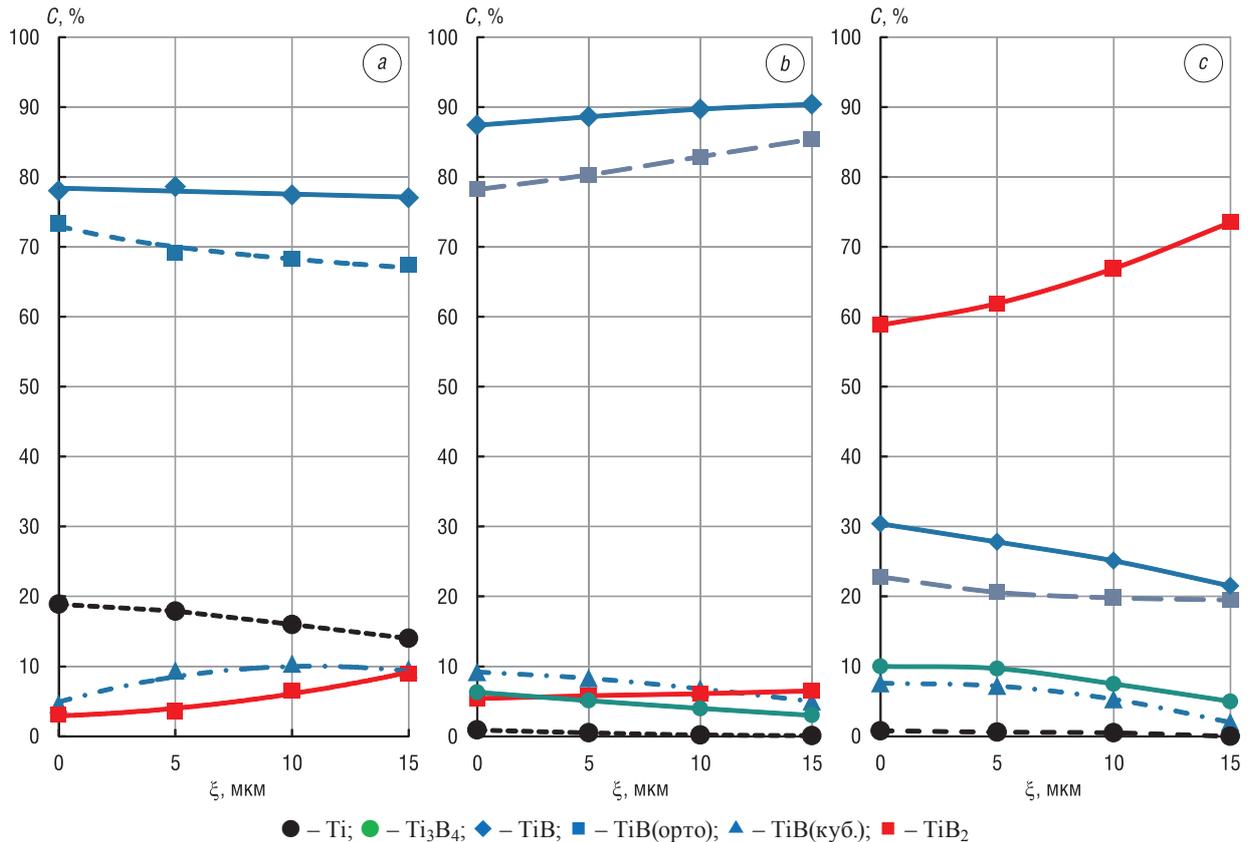


Рис. 4. Фазовый состав продуктов СВС в системе $Ti+xB$ при наложении ультразвука в зависимости от амплитуды колебаний: $a - x = 0,75$; $b - x = 1,0$; $c - x = 1,5$

Fig. 4. The phase composition of SHS products in the $Ti + xB$ system upon application of ultrasound depending on the oscillation amplitude: $a - x = 0.75$; $b - x = 1.0$; $c - x = 1.5$

Влияние ультразвука на кинетику взаимодействия в волне СВС. Кроме уже рассмотренного в статье теплового воздействия УЗК на СВС-процесс возможно прямое, или физическое (микроскопическое), влияние ультразвука на кинетику превращений в высокотемпературной зоне волны горения. Прежде всего воздействие УЗК на жидкости приводит к ультразвуковому капиллярному эффекту (УКЭ) [12] – ускорению капиллярного растекания, вызванного кавитацией. Влияние капиллярного растекания на режимы и скорость волны СВС теоретически исследовано в [13] на примере системы $Ti-C$. Показано, что скорость стационарного горения зависит от отношения характерного времени реакции t_r и характерного времени растекания t_s : $\varepsilon = t_r/t_s$. Величина t_r обусловлена кинетикой диффузии в слое образовавшегося твердого продукта или в жидкой фазе: $t_r = r_c^2 / D(T)$, где r_c – радиус капилляра (в данном случае – половина расстояния между дисперсными частицами сажи, окружающими частицу титана при СВС в системе $Ti-C$), $r_c \sim 1$ мкм.

Величину t_s можно оценить следующим образом. Капиллярное давление p_c определяется как [14]

$$p_c = 2\sigma \cos\theta / r_c,$$

где σ – поверхностная энергия, Дж/м²; θ – контактный угол смачивания. Для смачивания поверхности углерода жидким титаном $\theta = 0$ [15], поскольку движущей силой смачивания является химическое сродство компонентов.

Расстояние l , проходимое жидкостью по капилляру, определяется из уравнения [14]

$$dl / dt = \frac{r_c^2 p_c}{8\mu l},$$

где μ – динамическая вязкость, Па·с.

Тогда характерное время растекания составляет $t_s = 2\mu l^2 / (r_c \sigma)$. Рассматривая реакционную ячейку радиусом R_{cel} , которая состоит из частицы титана радиусом R_{Ti} , окруженной частицами сажи, получим характерное расстояние $l = R_{cel} - R_{Ti}$.

В случае, когда лимитирующей (наиболее медленной) стадией является растекание (так называемый капиллярный режим), то есть t_s велико ($\varepsilon = t_r/t_s \ll 1$), для стационарного горения скорость U связана с величиной ε как [2]

$$U^2 \sim \varepsilon.$$

При наложении УЗК на волну СВС скорость растекания возрастает вследствие УКЭ, то есть характерное время t_s уменьшается, что должно привести к возрастанию скорости горения. Но тогда изменится соотношение характерных времен: $\varepsilon = t_r/t_s \gg 1$, и лимитирующей стадией станет кинетика взаимодействия, то есть процесс горения перейдет в кинетический режим.

Кинетика взаимодействия в волне СВС включает образование зародышей твердой фазы – продукта в расплаве (с энергией активации E_n), и их последующий рост, лимитируемый диффузией в расплаве (с энергией активации E_d). Оба указанных «элементарных» процесса являются термически активируемыми, поэтому их суммарное действие можно охарактеризовать одной эффективной энергией активации E , Дж/моль, которую при исследовании СВС-процессов определяют из экспериментальной зависимости скорости горения U от температуры T . Для кинетического режима скорость стационарного горения обычно оценивают по формуле Зельдовича – Франк-Каменецкого [16]:

$$U^2 = \frac{\lambda}{\rho} \frac{RT_{ad}^2}{QE} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{ad}}\right), \quad (5)$$

где λ – теплопроводность, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); k_0 – кинетическая константа, с⁻¹; Q – тепловыделение реакции, Дж/кг; T_{ad} – адиабатическая температура горения, К.

Подставляя в формулу (5) выражение для адиабатической температуры горения $T_{ad} = T_0 + Q/c_p$, где $T_0 = 298$ К – начальная температура, c_p – теплоемкость, Дж/(моль·К), получим

$$U^2 = \frac{\lambda}{\rho} \frac{R(T_0 + Q/c_p)^2}{QE} k_0 \exp\left[-\frac{E}{R(T_0 + Q/c_p)}\right]. \quad (6)$$

Поскольку для сильно экзотермических СВС-систем $T_{ad} \gg T_0$, то есть $Q/c_p \gg T_0$, то можно записать выражение (6) в приближенном виде

$$U^2 = \frac{\lambda}{\rho} \frac{RQ}{c_p^2 E} k_0 \exp\left[-\frac{E}{RQ/c_p}\right]. \quad (7)$$

На микроскопическом уровне УЗК могут влиять как на эффективную энергию активации E за счет перемешивания расплава, так и на тепловыделение Q за счет изменения условий зародышеобразования конкурирующих фаз в многофазной системе. Как видно из формулы (7), при определенном соотношении между изменением параметров E и Q это может обеспечить снижение скорости горения, которое наблюдалось авторами экспериментально в системах Ti–C–Ni–Mo [8] и Ti–B [4].

Рассмотрим это влияние несколько подробнее. При кристаллизации сплавов в ультразвуковом поле наблюдается изменение структуры слитка – в частности, существенное уменьшение размеров зерен как основы сплава, так и интерметаллических включений, что связано с изменением условий кристаллизации [17]. В отсутствие внешних полей энергия активации гомогенной кристаллизации, которая соответствует энергии Гиббса образования критического зародыша $E_n \equiv \Delta G^*$, имеет вид [18]

$$E_n = \frac{16\pi\sigma^3}{3\Delta G_v^2}, \quad (8)$$

где ΔG_v – изменение энергии Гиббса при кристаллизации в расчете на единицу объема, Дж/м³.

В акустической волне имеется давление P_a , и при возникновении кавитации под действием УЗК, когда P_a превышает внутреннее давление в жидкости P_0 , происходит снижение энергии активации зародышеобразования [19]:

$$E_n = \frac{16\pi\sigma^3}{3[\Delta G_v + P_a - P_0]^2}. \quad (9)$$

Микроскопическое (физическое) воздействие УЗК на кристаллизующийся расплав в многофазной системе может привести к изменению фазового состава твердого продукта, что наблюдалось экспериментально [4]. Это связано с тем, что в жидких сплавах имеются кластеры – группы атомов с ближним порядком [20], которые являются предзародышами при гомогенной кристаллизации. Строение и состав кластеров зависит от температуры и состава сплава и может изменяться под действием внешних факторов [21]. Тогда изменение состава кластеров под влиянием УЗК в бинарном или многокомпонентном расплаве, кристаллизующемся в волне СВЧ, может изменить «конкуренцию» между образующимися зародышами разных фаз в неравновесных условиях, типичных для СВЧ-процессов, что неизбежно приведет к снижению тепловыделения брутто-реакции Q по сравнению со случаем отсутствия ультразвукового воздействия и, соответственно, к уменьшению температуры горения.

В связи с вышеизложенным, совместное действие таких физических факторов, как понижение эффективной энергии активации горения E из-за уменьшения E_n и снижение тепловыделения Q вследствие изменения кинетики зародышеобразования различных конкурирующих фаз, может привести к понижению скорости горения (см. формулу (6)).

Закключение. В данной работе предложена и обоснована концепция разделения влияния УЗК на СВЧ в бинарных и многокомпонентных системах на тепловое (макроскопическое), связанное с охлаждением образца из-за вынужденной конвекции окружающего газа, и физическое (нетепловое, или микроскопическое), заключающееся в изменении условий неравновесной кристаллизации твердого продукта.

Список использованных источников

1. Франк-Каменецкий, Д. А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д. А. Франк-Каменецкий. – М.: Наука, 1987. – 502 с.
2. Свойства элементов: справочник / под ред. М. Е. Дрица. – М.: Metallurgia, 1985. – 672 с.
3. Лариков, Л. Н. Структура и свойства металлов и сплавов: справочник / Л. Н. Лариков, Ю. Ф. Юрченко. – Киев: Наук. думка, 1985. – 437 с.
4. Клубович, В. В. Особенности формирования объемных пористых систем при самораспространяющемся высокотемпературном синтезе. Бориды / В. В. Клубович, М. М. Кулак, Б. Б. Хина // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2019. – Т. 64, № 1. – С. 14–24. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-14-24>
5. Mukasyan, A. S. Discrete reaction waves: Gasless combustion of solid powder mixtures / A. S. Mukasyan, A. S. Rogachev // Progress in Energy and Combustion Science. – 2008. – Vol. 34, № 3. – P. 377–416. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.09.002>
6. Питаевский, Л. П. Физическая кинетика / Л. П. Питаевский, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1979. – 530 с.
7. Клубович, В. В. Структурообразование тугоплавких соединений титана, получаемых методом СВЧ при ультразвуковых воздействиях / В. В. Клубович, М. М. Кулак // Вестн. Фонда фундамент. исслед. – 2013. – № 3. – С. 80–100.
8. Khina, B. B. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC–metallic binder” / B. B. Khina, M. M. Kulak // J. Alloys Compd. – 2013. – Vol. 578. – P. 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.07.030>
9. Влияние ультразвуковых колебаний на процессы структурообразования продуктов в системе титан-бор, получаемых методом СВЧ / В. В. Клубович [и др.] // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2015. – Т. 2. – С. 70–88.
10. Клубович, В. В. Ультразвуковой способ управления структурообразованием боридов титана в волне СВЧ / В. В. Клубович, М. М. Кулак, Б. Б. Хина // Перспективные материалы и технологии: в 2 т. / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Т. 1. – С. 5–16.
11. Хина, Б. Б. Применение Calphad-подхода для термодинамического расчета адиабатической температуры СВЧ в системе титан-бор / Б. Б. Хина, М. М. Кулак, В. В. Клубович // Вестн. Фонда фундамент. исслед. – 2019. – № 2. – С. 150–162.
12. Прохоренко, П. П. Ультразвуковой капиллярный эффект / П. П. Прохоренко, Н. В. Дежкунов, Г. Е. Коновалов. – Минск: Наука и техника, 1981. – 135 с.
13. Влияние капиллярного растекания на распространение волны горения в безгазовых системах / Е. А. Некрасов [и др.] // Физика горения и взрыва. – 1978. – Т. 14, № 5. – С. 26–32.

14. Левич, В. Г. Физико-химическая гидродинамика / В. Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 699 с.
15. Найдич, Ю. В. Взаимодействия металлических расплавов с поверхностью алмаза и графита / Ю. В. Найдич, Г. А. Колесниченко. – Киев: Наук. думка, 1967. – 87 с.
16. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.
17. Eskin, G. I. Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts / G. I. Eskin. – London: CRC Press, 1998. – 352 p. <https://doi.org/10.1201/9781498701792>
18. Mullin, J. W. Crystallization / J. W. Mullin. – 4th ed. – Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2001. – 600 p.
19. Primary nucleation induced by ultrasonic cavitation / C. Virone [et al.] // J. Crystal Growth. – 2006. – Vol. 294, iss. 1. – P. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.05.025>
20. Френкель, Я. И. Кинетическая теория жидкостей / Я. И. Френкель. – Л.: Наука, 1975. – 592 с.
21. Boettinger, W. J. Solidification / W. J. Boettinger, D. K. Banerjee // Physical Metallurgy / eds.: D. E. Laughlin, K. Hono. – 5th ed. – Elsevier, 2014. – Vol. 1. – P. 639–850. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53770-6.00007-1>

References

1. Frank-Kamenetskii D. A. *Diffusion and Heat Transfer in Chemical Kinetics*. New York, Plenum Press, 1969. 574 p.
2. Drits M. E. (ed.). *Elements Properties*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1985. 672 p. (in Russian).
3. Larikov L. N., Yurchenko Yu. F. *Structure and Properties of Metals and Alloys*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1985. 437 p. (in Russian).
4. Klubovich V. V., Kulak M. M., Khina B. B. Specific features of formation of bulk porous systems in the self-propagating high-temperature synthesis. Borides. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 1, pp. 14–24 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-1-14-24>
5. Mukasyan A. S., Rogachev A. S. Discrete reaction waves: Gasless combustion of solid powder mixtures. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2008, vol. 34, no. 3, pp. 377–416. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2007.09.002>
6. Pitaevskii L. P., Lifshits E. M. *Physical Kinetics. Volume 10 of Course of Theoretical Physics*. Oxford [et. al.], Pergamon Press, 1981. <https://doi.org/10.1016/c2009-0-07802-7>
7. Klubovich V. V., Kulak M. M. Structure formation of refractory titanium compounds obtained by the SHS method under ultrasonic influences. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, 2013, no. 3, pp. 80–100 (in Russian).
8. Khina B. B., Kulak M. M. Effect of ultrasound on combustion synthesis of composite material “TiC–metallic binder”. *Journal of Alloys and Compounds*, 2013, vol. 578, pp. 595–601. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2013.07.030>
9. Klubovich V. V., Kulak M. M., Platonov L. L., Khina B. B. The influence of ultrasonic vibrations on the processes of structure formation of products in the titanium-boron system obtained by SHS. Klubovich V. V. (ed.). *Perspektivnye materialy i tekhnologii. T. 2* [Promising Materials and Technologies. Vol. 2]. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 2015, pp. 70–88 (in Russian).
10. Klubovich V. V., Kulak M. M., Khina B. B. Ultrasonic method for controlling the structure formation of titanium borides in the SHS wave. Klubovich V. V. (ed.). *Perspektivnye materialy i tekhnologii. T. 1* [Promising Materials and Technologies. Vol. 1]. Vitebsk, Vitebsk State Technological University, 2017, pp. 5–16 (in Russian).
11. Khina B. B., Kulak M. M., Klubovich V. V. Application of the Calphad approach for thermodynamic calculation of the adiabatic temperature of SHS in a titanium-boron system. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, 2019, no. 2, pp. 150–162 (in Russian).
12. Prokhorenko P. P., Dezhkunov N. V., Kononov G. E. *Ultrasonic Capillary Effect*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1981. 135 p. (in Russian).
13. Nekrasov E. A., Maksimov Yu. M., Ziatdinov M. X., Shteinberg A. S. Effect of capillary spreading on combustion-wave propagation in gas-free system. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 1978, vol. 14, no. 5, pp. 575–581. <https://doi.org/10.1007/bf00789713>
14. Levich V. G. *Physicochemical Hydrodynamics*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall, 1962. 700 p.
15. Naidich Yu. V., Kolesnichenko G. A. *Interactions of Metal Melts with the Surface of Diamond and Graphite*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1967. 87 p.
16. Zel'dovich Ya. B., Barenblatt G. I., Librovich V. B., Makhviladze G. M. *Mathematical Theory of Combustion and Explosion*. New York, Consultants Bureau, 1985. 597 p.
17. Eskin G. I. *Ultrasonic Treatment of Light Alloy Melts*. London, CRC Press, 1998. 352 p. <https://doi.org/10.1201/9781498701792>
18. Mullin J. W. *Crystallization*. 4th ed. Oxford, UK, Butterworth-Heinemann, 2001. 600 pp.
19. Virone C., Kramer H. J. M., Rosmalen van G. M., Stoop A. H., Bakker T. W. Primary nucleation induced by ultrasonic cavitation. *Journal of Crystal Growth*, 2006, vol. 294, iss. 1, pp. 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2006.05.025>
20. Frenkel' Ya. I. *Kinetic Theory of Liquids*. New York, Dover, 1955. 500 p.
21. Boettinger W. J., Banerjee D. K. Solidification. Laughlin D. E., Hono K., eds. *Physical Metallurgy. Vol. 1*. 5th ed. Elsevier, 2014, pp. 639–850. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-53770-6.00007-1>

Информация об авторах

Хина Борис Борисович – доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, Минск, 220141, Республика Беларусь); профессор, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, Минск, 220096, Республика Беларусь). E-mail: khina@tut.by

Клубович Владимир Владимирович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией пластичности, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v_klubovich@tut.by

Кулак Михаил Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики металлов, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Генерала Людникова, 13, Витебск, 210009, Республика Беларусь). E-mail: mmk_vit@tut.by

Information about the authors

Boris B. Khina – D. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Principal Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., Minsk, 220141, Republic of Belarus); Professor, Belarusian State Aviation Academy (77, Uborevich Str., 220096, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: khina@tut.by

Vladimir V. Klubovich – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory of Plasticity, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus); Principal Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v_klubovich@tut.by

Mikhail M. Kulak – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Laboratory of Metal Physics, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus (13, General Ludnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: mmk_vit@tut.by

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 537.622.4:621.318.1

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-17-24>

Поступила в редакцию 19.02.2020

Received 19.02.2020

А. К. Вечер¹, Г. А. Говор¹, К. И. Янушкевич¹, У. Т. Бердиев², Ф. Ф. Хасанов²¹*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
Минск, Республика Беларусь*²*Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта, Ташкент, Республика Узбекистан*

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ СИНТЕЗА НА МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКОВ ЖЕЛЕЗА

Аннотация. Исследовано влияние условий синтеза на магнитные характеристики композиционных материалов на основе железных порошков ASC 100.29 (Швеция) и LiaoNing (Китай). Поверхность частиц порошков металлического железа капсулирована изоляционным ферритным покрытием, состоящим из окислов железа и фосфидов. Синтез проводился при температуре 150 °С из газовой среды в специальном реакторе при давлении 1 атм. Изолирующие оксидные покрытия наносились как на частицы исходных порошков железа без обработки, так и на предварительно отожженные порошки в инертной атмосфере и в смеси водород-аргон. Для проведения исследований магнитных характеристик методом прессования изготавливались сердечники в виде колец. Зависимость индукции от величины магнитного поля, потери на перемагничивание (гистерезисные потери) по полной и по частной петле регистрировались на экспресс-магнитометре. Величина потерь рассчитывалась по площади петли гистерезиса. Результаты показывают, что композиционные низкочастотные магнитные материалы на основе порошков металлического железа ASC 100.29 (Швеция) и LiaoNing (Китай) имеют близкие по величине магнитные параметры – практически идентичные зависимости $B = f(H)$, однако потери на перемагничивание для ASC 100.29 существенно ниже, чем для LiaoNing порошка, при равных условиях синтеза изоляционных покрытий. Возможно использование таких материалов в качестве магнитопроводов в электротехнических устройствах, таких как сердечники высокочастотных трансформаторов и ряда электрических машин. Поскольку такие материалы могут работать на частотах от 1 кГц и выше, это позволит существенно снизить габаритные размеры и повысить эффективность электротехнических изделий.

Ключевые слова: магнитно-мягкий композиционный материал, железный порошок, ферритное изоляционное покрытие, дроссели, высокочастотные трансформаторы, статоры и роторы электромашин

Для цитирования: Исследование влияния условий синтеза на магнитные характеристики композиционных материалов на основе порошков железа / А. К. Вечер [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 17–24. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-17-24>

Alexander K. Vetcher¹, Gennady A. Govor¹, Kazimir I. Yanushkevich¹, Usan T. Berdiev², Fazil F. Khasanov²¹*Scientific and Practical Material Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus*²*Tashkent Railway Engineering Institute, Tashkent, Republic of Uzbekistan*

STUDY OF THE INFLUENCE OF CONDITIONS OF SYNTHESIS ON MAGNETIC CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON IRON POWDERS

Abstract. The influence of synthesis conditions on the magnetic characteristics of composite materials based on iron powders ASC 100.29 (Sweden) and LiaoNing (China) is investigated. The surface of metallic iron powders is encapsulated by an insulating ferrite coating, consisting of iron oxides and phosphides. The synthesis was carried out at a temperature of 150 °C from a gaseous medium in a special reactor at a pressure of 1 atm. Insulating oxide coatings were applied both to the initial iron powder without treatment, and to previously annealed powders in an inert atmosphere and in a mixture of hydrogen-argon. To conduct studies of magnetic characteristics, cores in the form of rings were made by pressing method. The dependence of induction vs. magnitude of the magnetic field, magnetization reversal losses (hysteresis losses) in the full and in the private loop were recorded by an express magnetometer. The value of losses was calculated by the hysteresis loops area. The results show that composite low-frequency magnetic materials based on metallic iron ASC 100.29 and LiaoNing powders have similar values of magnetic parameters – almost identical $B = f(H)$ dependencies, but the magnetization reversal losses for ASC 100.29 are significantly lower than for LiaoNing powder under equal insulating coatings synthesis conditions. It is possible to use such materials as magnetic cores in various electrical devices, such as cores of high-frequency transformers and a number of electrical machines. Since such materials can operate at frequencies from 1 kHz and higher, this will significantly reduce the overall dimensions and increase the efficiency of electrical products.

Keywords: soft magnetic composite material, iron powder, ferrite insulating coating, inductors, high-frequency transformers, stators and rotors of electric machines

For citation: Vetcher A. K., Govor G. A., Yanushkevich K. I., Berdiev U. T., Khasanov F. F. Study of the influence of conditions of synthesis on magnetic characteristics of composite materials based on iron powders. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 17–24 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-17-24>

Введение. Композиционные материалы с необходимым набором эксплуатационных свойств широко применяются в узлах различных механизмов и машин в таких областях промышленности, как электротехника и электроника. Так как от способа и методики обработки исходных веществ зависят конечные свойства готовых изделий, необходимо правильно выбрать условия получения композиционных магнитно-мягких материалов, обеспечить контролируемый химический состав и структуру, что гарантирует требуемые физические и функциональные свойства.

Для материалов, работающих в переменных электромагнитных полях, важнейшими характеристиками является магнитная проницаемость, индукция и потери на перемагничивание и вихревые токи [1–5]. Величина удельного электрического сопротивления определяет граничную частоту, с которой целесообразно применение данного материала. В настоящее время ряд фирм производит композиционные магнитно-мягкие материалы на основе различных капсулированных порошков железа. Изолирующие слои препятствуют частицам железа контактировать друг с другом. В результате свойства известных композиционных магнитно-мягких материалов близки к свойствам электротехнической стали. Однако наличие изоляционного слоя, состоящего из магнитнеупорядоченных веществ, между отдельными металлическими частицами приводит к уменьшению максимальной магнитной проницаемости материала до $\mu_m = 100\text{--}500$, а величина магнитной индукции снижается до $B_m = 1,6$ Тл [6; патент RU 2 465 669 C1 «Способ изготовления композиционного магнитно-мягкого материала», авторы – Г. А. Говор, В. И. Митюк, А. В. Тамонов]. Для эффективного использования создаваемых композиционных материалов в электротехнических устройствах необходимо повысить магнитную индукцию и магнитную проницаемость, снизить величину потерь в материале. Поскольку указанные электромагнитные параметры получаемых композитов зависят от размеров и морфологии частиц, чистоты исходных порошков; от химического состава и толщины изолирующих покрытий, атмосферы, в которой происходит обработка, необходимо провести комплексное исследование свойств исходных и получаемых материалов, изучить влияние условий обработки и подобрать оптимальный состав наносимых оксидных покрытий.

Целью данной работы является исследование влияния условий синтеза композиционных материалов на основе порошков металлического железа с изолирующими покрытиями на его магнитные характеристики.

Синтез образцов и методики исследования. Исходя из требований к исходным порошкам и с учетом ценового параметра в качестве основы выбраны два вида порошков: водно-атомизированный порошок ASC 100.29 (Hoganes, Швеция) и производства компании LiaoNing (Китай). Размер частиц обоих порошков составлял 50–150 мкм. Чистота по содержанию примесей порошка ASC 100.29 – 99,9 %, LiaoNing – 98,69 %. Химический состав порошков представлен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Состав распыленного воздухом порошка LiaoNing (Китай) и распыленного водой порошка ASC 100.29 (Швеция)

Table 1. Composition of air-sprayed LiaoNing powder (China) and water-sprayed powder ASC 100.29 (Sweden)

Тип железного порошка	Fe, %	Mn, %	Si, %	C, %	P, %
LiaoNing (Китай)	98,69	0,35	0,1	0,022	0,028
ASC 100.29 (Швеция)	99,5	0,08	0,04	0,08	0,01

По другим сертификационным параметрам порошки идентичны.

В [7] показано, что в зависимости от толщины изоляционного покрытия и размера частиц исходного порошка металлического железа получаемые композиционные материалы можно разделить на два класса: низкочастотные ($f < 1$ кГц) и высокочастотные ($f > 1$ кГц). Для последующих высокочастотных применений с помощью сепаратора S49-1000-1 (рис. 1) отсеяны порошки с размером меньше 100 мкм, для низкочастотных –

с размером больше 100 мкм. После сепарации на поверхность частиц железа наносился изоляционный слой. Порошок железа помещался в специальную камеру и обрабатывался в парах спиртового раствора ортофосфорной кислоты H_3PO_4 при давлении от 0,1 до 1,0 атм (патент ВУ 16908 «Способ изготовления композиционного магнитно-мягкого материала», авторы – Г.А. Говор, В.И. Митюк, А.В. Тамонов; патент ВУ 14066 «Дроссель», авторы – Г.А. Говор, В.М. Дубровенский, А.Л. Шитенков, А.М. Царик, С.П. Худаков; патент ВУ 13277 «Источник питания инверторного типа», авторы – Г.А. Говор, С.В. Авдейчук). В результате на поверхности частиц железа образовалось сложное по составу покрытие из ферритных соединений и фосфатов. Толщина изоляционного слоя на частице железа зависит от времени обработки порошка и концентрации спиртового раствора ортофосфорной кислоты. Морфология порошков изучена с помощью электронного микроскопа Hitachi.

Магнитная проницаемость композитов измерена в диапазоне частот до 2,0 кГц. Для исследования особенностей магнитных свойств изготавливались сердечники в виде колец методом прессования композиционных порошков под давлением 7–8 тн/см². Для изучения влияния отжига на изменение магнитных параметров сердечники отжигались при температуре до 350 °С в различных средах в вакуумной камере (рис. 2). Плотность образцов определена методом гидростатического взвешивания в дистиллированной воде. Измерения важных магнитных характеристик – индукции, потерь, магнитной проницаемости – выполнены на экспресс-магнетометре, разработанном и изготовленном в Научно-практическом центре Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (рис. 3). Регистрировались зависимости перемагничивания получаемых образцов, определялась площадь петли гистерезиса в пикселах и рассчитывались потери. Размерность пиксела определялась по измерениям магнитного потока с помощью микроверметра Ф5 050.

Результаты эксперимента и обсуждение. На рис. 4 приведены полученные с помощью растрового электронного микроскопа Hitachi изображения порошков металлического железа фирм Hогanes ASC 100.29 и LiaoNing после капсулирования оксидными слоями. Частицы имеют очень сложную морфологию и различные размеры (от 5 до 150 мкм), что позволило при прессовании изделий на основе таких композиционных порошков достичь достаточно высокой плотности (заполняемость достигает 93–95 %), от которой в свою очередь зависит величина электромагнитных параметров спрессованного композита.

На рис. 5 представлены статические кривые намагничивания композитов на основе железных металлических порошков ASC 100.29 (кривая 1) и LiaoNing (кривая 2) с размером зерна



Рис. 1. Сепаратор S49-1000-1 по разделению фракций порошка на меньше 100 мкм и больше 100 мкм

Fig. 1. Separator S49-1000-1 for separation of powder fractions into less than 100 μm and more than 100 μm

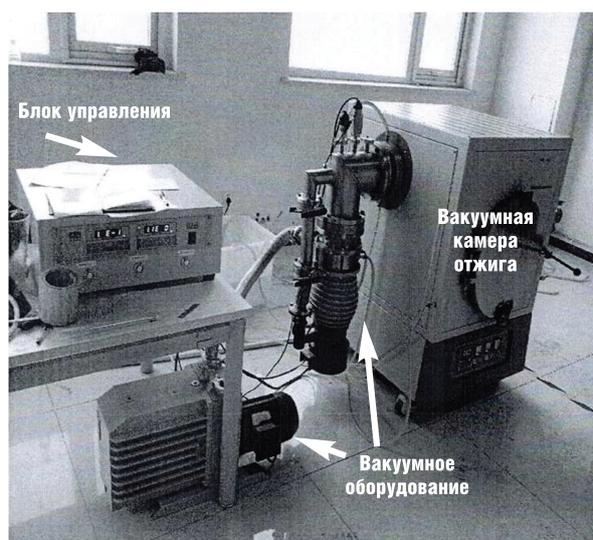


Рис. 2. Вакуумная электропечь для отжига сердечников VF1600

Fig. 2. Vacuum electric furnace for core annealing VF1600

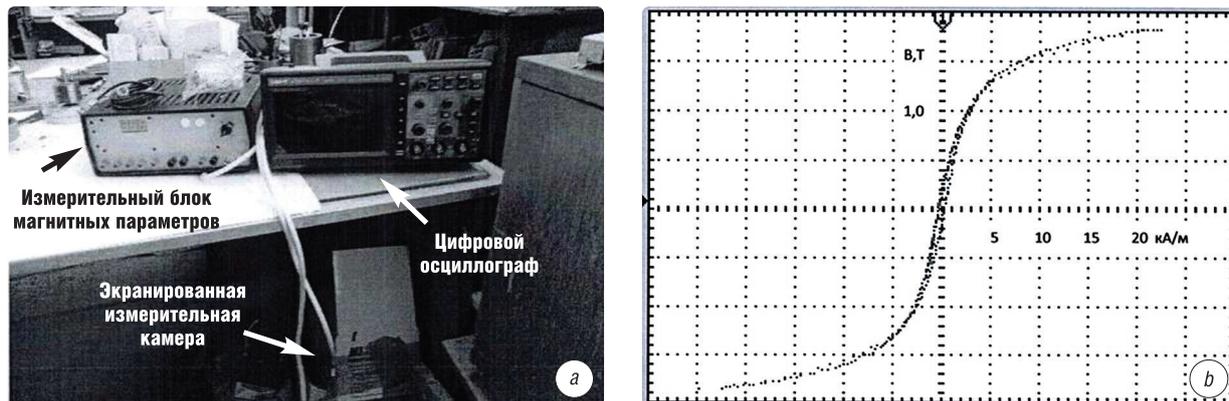


Рис. 3. Внешний вид экспресс-магнетометра (а) и пример получаемой петли гистерезиса исследуемых образцов на экране осциллографа (b)

Fig. 3. The appearance of the express magnetometer (a) and an example of the obtained hysteresis loop of the studied samples on the oscilloscope screen (b)

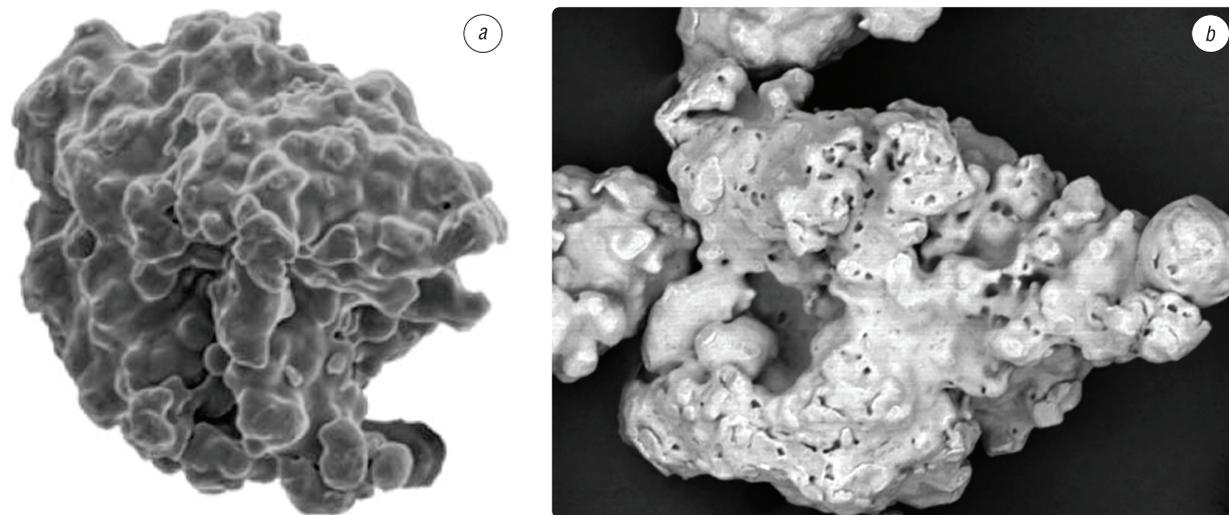


Рис. 4. РЭМ-изображения порошка, обработанного изолирующими ферритными покрытиями: а – ASC 100.29 [12], б – LiaoNing

Fig. 4. SEM image of a powder treated with insulating ferrite coatings: a – ASC 100.29 [8], b – LiaoNing

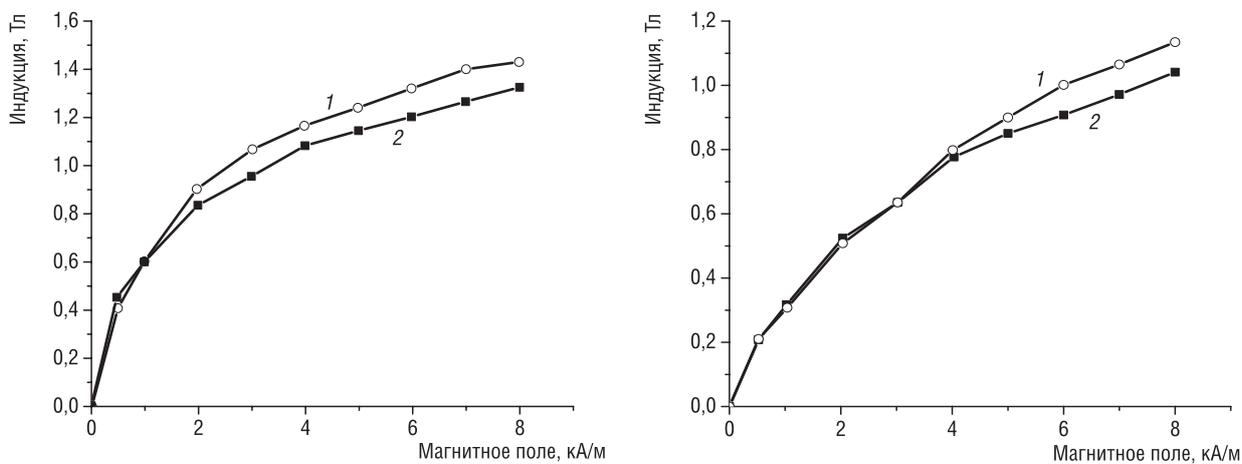


Рис. 5. Зависимости $B = f(H)$ магнитно-мягкого композита на основе ASC 100.29 (кривая 1) и LiaoNing (кривая 2): а – с размером зерна больше 100 мкм, б – с размером зерна меньше 100 мкм

Fig. 5. Dependences $B = f(H)$ of a soft magnetic composite based on ASC 100.29 (curve 1) and LiaoNing (curve 2): a – with a grain size more than 100 μm , b – with a grain size less than 100 μm

больше 100 мкм и меньше 100 мкм. Зависимости $B = f(H)$ демонстрируют, что магнитная индукция композиционного материала на основе порошка китайской фирмы в диапазоне полей $H = 1-9$ кА/м для низкочастотного применения и $H = 4-9$ кА/м для высокочастотного применения уступает по значению индукции композитам, изготовленным на основе порошка ASC 100.29, на 8 %. Это может быть обусловлено тем, что порошок фирмы LiaoNing кроме чистого железа содержит больше примесей (1,31 % против 0,5 % у ASC 100.29). Кроме того, при прессовании изделий на основе порошка компании Hoganes удалось достигнуть большей плотности готовых изделий ($\rho = 7,62$ г/см³), чем при прессовании порошка производства фирмы LiaoNing ($\rho = 7,5$ г/см³). Поэтому дальнейшие исследования общих потерь проводились на композитах на основе железного металлического порошка ASC 100.29.

Известно, что потери на перемагничивание магнитного материала P складываются из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи [7]:

$$P = P_e + P_g,$$

где P_e – потери на вихревые токи, P_g – потери на гистерезис.

Поскольку каждая частица материала покрыта изоляционным покрытием, потери на вихревые токи минимальны. Значит, общие потери в основном складываются из потерь на гистерезис, которые создаются в процессе смещения стенок доменов на начальной стадии намагничивания. Вследствие неоднородности структуры магнитного материала на перемещение стенок доменов затрачивается магнитная энергия.

Для снижения гистерезисных потерь обычно используют отжиг материала [9]. Такой процесс снимает напряжения внутренней структуры материала, уменьшает количество дислокаций и иных дефектов, а также несколько укрупняет зерно. На рис. 6 представлены зависимости потерь от индукции для материала ASC 100.29 в виде сердечников на частоте 1 кГц при перемагничивании по полной петле до отжига и после отжига в вакууме при 350 °С в течение 3 ч, а на рис. 7 – зависимости индукции от величины магнитного поля для того же материала до отжига и после отжига. Установлено, что отжиг готовых сердечников из композиционного материала позволяет снизить потери и повысить индукцию материала на 5–8 %, что фактически согласуется с [9].

На рис. 8 представлена зависимость гистерезисных потерь от индукции для полного цикла на частоте перемагничивания 1, 2 и 5 кГц для низкочастотного материала на основе ASC 100.29 с размером зерна $d > 100$ мкм. Видно, что на частотах 1 и 2 кГц величина потерь достигает

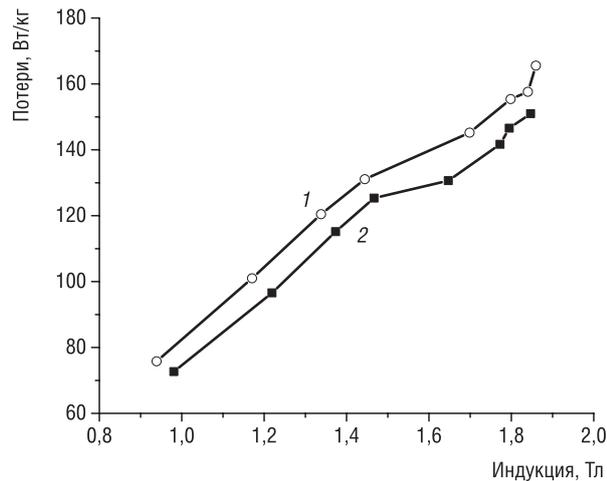


Рис. 6. Потери для низкочастотного композиционного материала на основе ASC 100.29 до отжига (кривая 1) и после отжига в вакууме при 350 °С в течение 3 ч (кривая 2) при перемагничивании по полной петле

Fig. 6. Losses for low-frequency composite material based on ASC 100.29 before annealing (curve 1) and after annealing in vacuum at 350 °С during 3 hours (curve 2) at reversal magnetization in a full loop

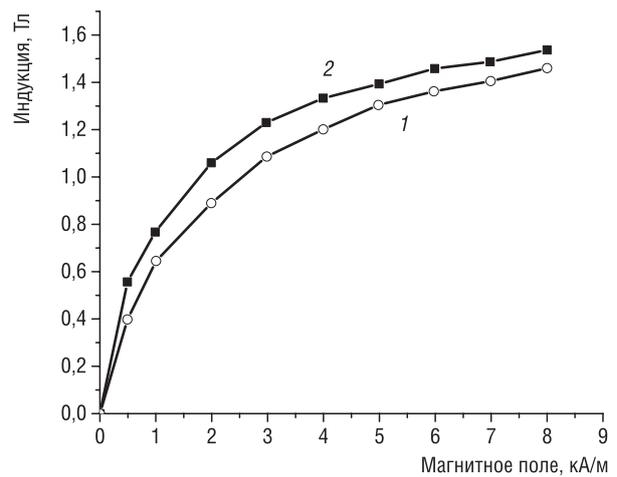


Рис. 7. Зависимости намагничивания $B = f(H)$ низкочастотного композиционного материала на основе ASC 100.29 до отжига (кривая 1), после отжига в вакууме при 350 °С в течение 3 ч (кривая 2)

Fig. 7. Magnetization dependences $B = f(H)$ of low-frequency composite material, based on ASC 100.29, before annealing (curve 1) and after annealing in vacuum at 350 °С during 3 hours (curve 2)

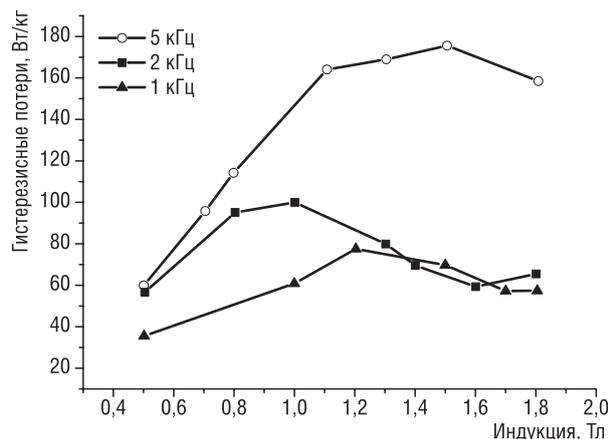


Рис. 8. Зависимость гистерезисных потерь от индукции для полного цикла на частоте перемагничивания 1, 2 и 5 кГц для низкочастотного материала на основе ASC 100.29 с размером зерна $d > 100$ мкм

Fig. 8. Dependence of hysteresis losses vs. induction for a full cycle at a reversal magnetization frequency of 1, 2, and 5 kHz for a low-frequency material based on ASC 100.29 with grain size $d > 100$ μm

максимума при индукции 1,0–1,2 Тл, далее несколько снижается и остается практически постоянной до индукции 2 Тл, а на частоте 5 кГц потери практически в 2 раза выше. Такая разница в величине гистерезисных потерь, вероятнее всего, обусловлена тем, что исследовались образцы на основе порошков с размером зерна $d > 100$ мкм. Поэтому такой композиционный материал целесообразно использовать в электротехнических изделиях, работающих на частотах до 1 кГц.

В табл. 2 приведены сравнительные данные по характеристикам различных композиционных материалов на основе железных порошков ASC 100.29 и LiaoNing. Из данных табл. 2 следует, что индукция и потери в материале зависят от типа исходного порошка, его чистоты, плотности сердечников на основе этих материалов и способов обработки (отжига в различных средах).

Т а б л и ц а 2. Сравнение характеристик композиционных материалов на основе железных порошков ASC 100.29 и LiaoNing

Table 2. Comparison of the characteristics of composite materials based on iron powders ASC 100.29 and LiaoNing

Тип железного порошка	Режим отжига	Источник питания для измерения потерь	ρ , г/см ³	B_{max} , Т	H_{max} , А/м	P , Вт/м ³
Порошок Hогanes ASC 100.29 > 100 мкм	Порошок без отжига	DC Power supply PS-305D	7,51	2,12	26600	169
		ИП 01126	7,51	2,09	26200	169
	Порошок без отжига, сердечник без отжига	DC Power supply PS-305D	7,62	1,61	13600	141
		ИП 01126	7,62	1,73	26200	150
	Порошок без отжига, сердечник с отжигом в вакууме	DC Power supply PS-305D	7,62	1,8	12000	713
Порошок с отжигом, сердечник с отжигом в водородной смеси	DC Power supply PS-305D	7,62	1,7	26200	164	
Порошок Hогanes ASC 100.29 < 100 мкм	Порошок без отжига, сердечник без отжига	ИП 01126	7,58	1,57	14800	145
Порошок LiaoNing > 100 мкм	Порошок без отжига, сердечник с отжигом в вакууме	DC Power supply PS-305D	7,42	1,58	26200	147
		DC Power supply PS-305D	7,59	1,34	26200	128
	Порошок без отжига, сердечник без отжига	DC Power supply PS-305D	7,41	1,47	26200	137

Заключение. В результате проведенных исследований установлено, что магнитные материалы на основе ASC 100.29 и LiaoNing имеют близкие магнитные характеристики – практически идентичные зависимости $B = f(H)$, однако потери на перемагничивание для композиционных материалов на основе порошков ASC 100.29 существенно ниже, чем для LiaoNing, соответственно $P = 90$ и 120 Вт/кг на частоте 1 кГц. Величина гистерезисных потерь линейно увеличивается с ростом внешнего поля, достигая максимума при величине индукции порядка 1 Тл. При дальнейшем увеличении магнитного поля имеет место некоторое уменьшение гистерезисных потерь. Уменьшение толщины изоляционных покрытий приводит к увеличению значения магнитной

индукции при 20 кА/м с $B_M = 1,7$ Тл до $B_M = 1,85$ Тл и к соответствующему росту гистерезисных потерь с $P = 80$ Вт/кг до $P = 90$ Вт/кг на частоте 1 кГц. Низкочастотный композиционный материал предпочтительно использовать при работе без перемагничивания по частной петле гистерезиса, так как гистерезисные потери в этом случае существенно меньше и соответственно равны $P = 22$ Вт/кг для частной петли и $P = 90$ Вт/кг для полной петли на частоте 1 кГц.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках совместного проекта БРФФИ–Узбекистан № Т19УЗБГ-004.

Acknowledgements

This work was financially supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research as part of the joint project BRFFR–Uzbekistan No. T19UZBG-004.

Список использованных источников

1. Janta, T. PM soft magnetic composition versus electrical sheets / T. Janta, A. Kordecki // *Soft magnetic material workshop, Euro PM*. – Japan, 2000. – P. 15–29
2. Тульчинский, Л. Н. Порошковые магнитомягкие материалы / Л. Н. Тульчинский, А. А. Панасюк // *Порошковая металлургия*. – 1995. – № 7–8. – С. 53–67.
3. Influence of resin type and content on electrical and magnetic properties of soft magnetic composites (SMCs) / M. M. Dias [et al.] // *Powder Technol.* – 2013. – Vol. 237. – P. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.006>
4. Magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with SiO₂ coating obtained by reverse microemulsion method / S. Wu [et al.] // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2015. – Vol. 381. – P. 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.01.030>
5. Sustarsic, B. SMC Materials in the Design of Small Electric Motors for Domestic Application / B. Sustarsic, A. Sirc, D. Milyavec // *Euro PM 2004: Conference Proceedings PM Functional Materials, 17–21 October 2004*. – Vienna, 2004. – Vol. 4. – P. 629–635.
6. Говор, Г. А. Композиционные магнитно-мягкие материалы на основе порошков железа и перспективы их применения в технике / Г. А. Говор, В. В. Михневич // *Неорганические материалы*. – 2007. – Т. 43, № 7. – С. 805–807.
7. Говор, Г. А. Особенности магнитных характеристик новых композиционных материалов на основе порошков железа / Г. А. Говор, А. К. Вечер, К. И. Янушкевич // *Перспективные материалы и технологии* / под ред. В. В. Клубовича. – Витебск: УО «ВГТУ», 2017. – Т. 2. – С. 278–299.
8. Chasoglou, D. Material Development, PM-Components Powder Manufacturing & Characterization. EPMA Summer School, June 2016. 2 [Electronic resource] / D. Chasoglou. – Mode of access: <https://www.epma.com/document-archive/summer-school-presentations/summer-school-2016/604-powder-manufacturing-characterization/file> – Date of access: 24.02.2020.
9. Dragoshanskii, Yu. N. Combined thermomagnetic and laser treatments of anisotropic electrical materials / Yu. N. Dragoshanskii, V. I. Pudov, V. V. Gubernatorov // *Physics of Metals and Metallography*. – 2011. – Vol. 111, № 5. – P. 464–470. <https://doi.org/10.1134/s0031918x1104003x>

References

1. Janta T., Kordecki A. PM soft magnetic composition versus electrical sheets. *Soft magnetic material workshop, Euro PM*. Japan, 2000, pp. 15–29.
2. Tulchinskii L. N., Panasiuk A. A. Powder soft magnetic materials. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy*, 1995, no. 7–8, pp. 53–67 (in Russian).
3. Dias M. M., Mozetic H. J., Barboza J. S., Martins R. M., Pelegrini L., Schaeffer L. Influence of resin type and content on electrical and magnetic properties of soft magnetic composites (SMCs). *Powder Technology*, 2013, vol. 237, pp. 213–220. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.006>
4. Wu S., Sun A., Lu Z., Cheng C., Gao X. Magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with SiO₂ coating obtained by reverse microemulsion method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2015, vol. 381, pp. 451–456. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.01.030>
5. Sustarsic B., Sirc A., Milyavec D. SMC Materials in the Design of Small Electric Motors for Domestic Application. *Euro PM 2004: Conference Proceedings PM Functional Materials, 17–21 October 2004. Vol. 4*. Vienna, 2004, pp. 629–635.
6. Govor G. A., Michnevich V. V. Composite soft magnetic materials based on iron powders and prospects for their application in technology. *Neorganicheskiye materialy = Inorganic Materials*, 2007, vol. 43, no. 7, pp. 805–807 (in Russian).
7. Govor G. A., Vechev A. K., Yanushkevich K. I. Features of the magnetic characteristics of new composite materials based on iron powders. Klubovich V. V. (ed.). *Perspektivnye materialy i tekhnologii. T. 2* [Promising Materials and Technologies. Vol. 2]. Vitebsk, 2017, pp. 278–299 (in Russian).
8. Chasoglou D. *Powder Manufacturing & Characterization. EPMA Summer School, June 2016. 2*. Available at: <https://www.epma.com/document-archive/summer-school-presentations/summer-school-2016/604-powder-manufacturing-characterization/file> (accessed 24 February 2020).
9. Dragoshanskii Yu. N., Pudov V. I., Gubernatorov V. V. Combined thermomagnetic and laser treatments of anisotropic electrical materials. *Physics of Metals and Metallography*, 2011, vol. 111, no. 5, pp. 464–470. <https://doi.org/10.1134/s0031918x1104003x>

Информация об авторах

Вечер Александр Константинович – старший научный сотрудник, лаборатория физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vetcher@physics.by

Говор Геннадий Антонович – доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, лаборатория физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: govor@physics.by

Янушкевич Казимир Иосифович – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kazimir@physics.by

Бердиев Усан Турдиевич – кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрический транспорт и высокоскоростной электроподвижной состав», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ул. Адылходжаева, 1, 100167, Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: berdiev1962@inbox.ru

Хасанов Фазил Фархад Аглы – аспирант, ассистент кафедры «Электрический транспорт и высокоскоростной электроподвижной состав», Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта (ул. Адылходжаева, 1, 100167, Ташкент, Республика Узбекистан). E-mail: tashiit_rektorat@mail.ru

Information about the authors

Alexander K. Vetcher – Senior Researcher, Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vetcher@physics.by

Gennady A. Govor – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Chief Researcher of Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: govor@physics.by

Kazimir I. Yanushkevich – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kazimir@physics.by

Usan T. Berdiev – Ph. D. (Technics), Professor, Head of the Department of Electric Transport and High-Speed Electric Rolling Stock of the Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (1, Adylhodzhaev Str., 100167, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: berdiev1962@inbox.ru

Fazil F. Khasanov – Graduate Student, Assistant of the Department of Electric Transport and High-Speed Electric Rolling Stock, Tashkent Institute of Railway Transport Engineers (1, Adylkhodzhaev Str., 100167, Tashkent, Republic of Uzbekistan). E-mail: tashiit_rektorat@mail.ru

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 613.648.4:004.942

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-25-34>

Поступила в редакцию 22.11.2019

Received 22.11.2019

С. С. Грабчиков¹, Е. А. Грабчикова¹, Д. С. Васин¹, Д. И. Тишкевич¹, С. Б. Ластовский¹,
А. С. Якушевич¹, Ю. В. Богатырев¹, И. В. Калагин², С. В. Митрофанов²

¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск,
Республика Беларусь

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Российская Федерация

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОБЕГОВ И ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ В ОДНОСЛОЙНЫХ И МНОГОСЛОЙНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Аннотация. С помощью программного комплекса SRIM рассчитаны линейные и массовые пробеги протонов и ионов аргона в экранах из алюминия, оксида алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$. Показано, что эффективность защиты от высокоэнергетических ионов материалами с большими значениями заряда ядер атомов (Z) выше с позиции линейных пробегов частиц и ниже с позиции массовых пробегов, чем материалами с низкими значениями Z . Определена зависимость пороговой энергии от Z высокоэнергетических ионов для экранов из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$. Проведены расчеты спектров потерь на ионизацию при прохождении протонов с энергией 20 МэВ и ионов криптона с энергией 7,75 ГэВ через многослойные структуры $Bi/Al/Al_2O_3$ и $Al/Al_2O_3/Bi$. Расчеты показали, что торможение высокоэнергетических частиц в случае, когда первый слой содержит тяжелый элемент, выше, чем в случае, когда первый слой содержит легкий элемент. Изучено влияние последовательности в расположении и толщины слоев в многослойных структурах системы $Bi/Al/Al_2O_3$ на эффективность защиты от высокоэнергетических ионов. Показано, что характер зависимостей $R(E)$ и потерь энергии ионов определяется очередностью расположения отдельных слоев, что связано с различием преобразования спектров материалом первого слоя. Рассмотренные экраны радиационной защиты могут быть использованы в элементах и аппаратуре ракетно-космической техники, могут обеспечить требования по устойчивости к воздействию различных видов ионизирующих излучений (электронное, протонное, гамма-излучение, тяжелые заряженные частицы и др.).

Ключевые слова: радиационная защита, тяжелые заряженные частицы, протоны, высокоэнергетические ионы, радиационные экраны, математическое моделирование

Для цитирования: Моделирование пробегов и потерь энергии высокоэнергетических ионов в однослойных и многослойных материалах / С. С. Грабчиков [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 25–34. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-25-34>

Sergey S. Grabchikov¹, Elena A. Grabchikova¹, Denis S. Vasin¹, Daria I. Tishkevich¹, Stanislav B. Lastovski¹,
Anna S. Yakushevich¹, Yrii V. Bogatyrev¹, Igor V. Kalagin², Semen V. Mitrofanov²

¹Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

²Joint Institute of Nuclear Research, Dubna, Russia

MODELING OF PATHS AND ENERGY LOSSES OF HIGH-ENERGY IONS IN SINGLE-LAYERED AND MULTILAYERED MATERIALS

Abstract. Linear and mass ranges of protons and argon ions in aluminum, alumina, bismuth, and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite shields were calculated using the SRIM software package. It is shown that the protection efficiency against high-energy ions by materials with large atomic charge (Z) values is higher, from the position of linear ranges of particles, and lower, from the position of mass ranges, in comparison with materials with low Z values. The dependence of the threshold energy on the serial number of particles for aluminum, bismuth, and composite $W_{77,7}Cu_{22,3}$ shields is determined. The ionization loss spectra for the passage of both protons with an energy of 20 MeV and krypton ions with an energy of 7.75 GeV through multi-layer $Bi/Al/Al_2O_3$ and $Al/Al_2O_3/Bi$ structures were calculated. These results showed that the braking of high-energy particles in the case when the first layer contains a heavy element is higher than in the case when the first layer contains a light element. The influence of the sequence in the arrangement and thickness of the layers in the multilayer structures of the $Bi/Al/Al_2O_3$ system on the efficiency of protection against high-energy ions was studied. It is shown that the nature of the dependences $R(E)$ and ion energy losses are determined by the sequence of arrangement of individual layers, which is due to the difference in the conversion of the spectra by the material of the first layer. The studied radiation shields can be used in aerospace and nuclear technologies, as well as in many scientific and medical devices, and can be used to protect against the effects of a wide range of ionizing radiation (electrons, protons, heavy charged particles, etc.).

Keywords: radiation protection, heavy charged particles, protons, high-energy ions, radiation shields, mathematical modeling

For citation: Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Vasin D. S., Tishkevich D. I., Lastovskii S. B., Yakushevich A. S., Bogatyrev Y. V., Kalagin I. V., Mitrofanov S. V. Modeling of paths and energy losses of high-energy ions in single-layered and multilayered materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 25–34 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-25-34>

Введение. При разработке новых материалов, используемых в элементах и аппаратуре ракетно-космической техники, необходимо выполнять требования по устойчивости к воздействию различных видов ионизирующих излучений (ИИ). Воздействие протонов или тяжелых ионов высоких энергий может приводить к внезапным отказам в работе радиоэлектронных приборов и блоков космических аппаратов (КА), что связано с возникновением радиационных эффектов в интегральных микросхемах (ИМС) (единичный сбой и выгорание, защелкивание и т. д.) [1]. Решение данной проблемы – очень сложная и многоуровневая задача. На практике для повышения радиационной надежности электронных компонентов, как правило, используют: конструктивно-технологические (схемотехнические) методы проектирования, «мажоритирование» (создание в ИМС второй, третьей и т. д. ИМС-дублера, которая в случае выхода из строя первой заменит ее) и конструктивную защиту (элементы конструкций КА, специализированные корпуса, локальная защита) [1, 2].

Для обеспечения радиационной защиты электронных компонентов КА от воздействия электронов и протонов радиационных поясов Земли (РПЗ) используют пластины или покрытия в виде локальной защиты, формируемые на отдельных элементах электронной аппаратуры [3–7]. Однако существует мнение [8], согласно которому защита от воздействия высокоэнергетических тяжелых ионов (в научной литературе часто используется термин «тяжелые заряженные частицы» (ТЗЧ)) путем использования радиационных экранов малоэффективна, поскольку потоки вторичных частиц и осколки вещества, создаваемые при взаимодействии ТЗЧ с материалом экрана, могут оказывать более негативный эффект, чем первичное излучение. Вместе с тем известно [9], что потоки протонов и электронов РПЗ сравнительно стабильны, и для основных околоземных орбит определены спектры ИИ. Потоки солнечных космических лучей (СКЛ) и галактических космических лучей (ГКЛ) являются нестабильными факторами и носят вероятностный характер. Потоки СКЛ в основном состоят из низкоэнергетических электронов и протонов ($E \sim 1$ кэВ) с плотностью 10^8 – 10^9 см⁻²·с⁻¹, однако во время солнечных вспышек значения энергий могут достигать 10^8 – 10^9 эВ [10]. В составе потоков ГКЛ преобладают протоны ($E \leq 10^{12}$ эВ), на долю остальных ядер приходится менее 10 %. Потоки ГКЛ характеризуются сравнительно небольшой плотностью – до 5 см⁻²·с⁻¹, но обладают огромной энергией – до 10^{20} эВ [11]. Согласно данным [12], энергетический спектр частиц в открытом космосе можно характеризовать следующими значениями потоков частиц на 1 мм² в 1 год: ~ 30 частиц с $E = 10$ ГэВ, $\sim 7 \cdot 10^{-3}$ частиц с $E = 1$ ТэВ, $\sim 1 \cdot 10^{-6}$ частиц с $E = 1$ ПэВ.

В околоземном космическом пространстве энергетический спектр ГКЛ существенно отличается от спектра ГКЛ в межзвездном пространстве, что связано с влиянием солнечного ветра (гелиосферы) и магнитного поля Земли. При этом влияние данных факторов на частицы с энергией выше 10Z ГэВ (Z – заряд ядер атомов) незначительно. Электронные компоненты обычно расположены внутри КА за внешним корпусом и элементами конструкций. Поэтому на околоземных орбитах энергии и количество воздействующих на электронные компоненты частиц будут ниже, чем приведенные выше, и вопрос защиты электронных компонентов от воздействия высокоэнергетических ионов путем использования радиационных экранов имеет большой практический интерес.

В связи с этим проблема изучения взаимодействия ТЗЧ с материалами защитных экранов является актуальной. Для проведения экспериментальных исследований необходимы дорогостоящие ускорители, способные ускорять ионы до огромных энергий, поэтому широкое распространение получили методы компьютерного моделирования процессов прохождения ионов заданной энергии в различных материалах (программные пакеты SRIM, GEANT4 и др.). В данной работе приведены расчеты пробегов и потерь энергии высокоэнергетических ионов в однослойных и многослойных материалах с помощью программного комплекса SRIM.

Методика моделирования. Линейные пробеги и энергетические потери ионов рассчитывались с помощью программы SRIM-2013.00 [13], в которой при моделировании процесса прохождения ТЗЧ в веществе применяется модель непрерывного замедления. В качестве высокоэнергетических воздействий использованы протоны, ионы гелия, углерода, неона, аргона, железа, криптона и ксенона с энергиями от 10 МэВ до 27,4 ГэВ. Все ионы направлялись перпендикулярно поверхности экранов. Число частиц при моделировании равнялось 10^3 ионов. Линейные, массовые пробеги и пороговые энергии фиксировались по наиболее вероятной длине пробега высокоэнергетических ионов. Модельными объектами служили однослойные экраны на основе алюминия, оксида алюминия, висмута, композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ и многослойных структур систем Bi/Al/Al₂O₃ с различными последовательностями и толщинами отдельных слоев. Толщина экранов из алюминия, оксида алюминия и висмута составляла 1,4 мм, толщина экрана из композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ – 1,5 мм. Многослойные структуры четырех типов имели следующее строение:

Bi/Al/Al₂O₃ и Al/Al₂O₃/Bi с толщинами отдельных слоев Bi – 0,6 мм, Al – 0,2 мм, Al₂O₃ – 0,6 мм и суммарной толщиной 1,4 мм;

Bi/Al/Al₂O₃/Bi/Al/Al₂O₃/Bi/Al/Al₂O₃ и Al/Al₂O₃/Bi/Al/Al₂O₃/Bi/Al/Al₂O₃/Bi с толщинами отдельных слоев Bi – 0,2 мм, Al – 0,067 мм, Al₂O₃ – 0,2 мм и суммарной толщиной 1,4 мм.

Результаты и обсуждение. *Пробеги и пространственное распределение высокоэнергетических ионов, потери энергии на торможение в алюминии, висмуте и композите W–Cu.*

С ростом заряда ядер атомов в экранах из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ расстояния, пройденные частицами в веществе до полной остановки (линейный пробег, R), уменьшаются. Соответственно энергии, необходимые для прохождения частицами экранов заданной толщины (d), с ростом Z возрастают. Изменение линейных пробегов ионов для разных материалов экрана в последовательности $W_{77,7}Cu_{22,3}$; Bi и Al возрастает, что обусловлено более низкой плотностью материала. Согласно данным [2], удельная плотность (ρ , г/см³) равна: Al – 2,7; Al₂O₃ – 3,9; Bi – 9,8; композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ – 17,02. Для определения экранирующей способности материала наряду с линейными пробегами используется массовый пробег, равный $R_m = R \cdot \rho$ (г·см⁻²).

Рассчитанные линейные и массовые пробеги протонов и ионов аргона в экранах из алюминия, оксида алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Следует отметить, что эффективность защиты от ТЗЧ материалами с большими значениями Z выше, чем материалами с низкими значениями Z , с позиции линейных пробегов частиц (линейной толщины экранов). С позиции массовых пробегов (массовой толщины экранов) материалы с низкими значениями Z обладают более эффективной защитой, чем материалы с большими значениями Z . Из представленных результатов также следует, что значения энергий ионов аргона, при которых $R \leq d$, для экранов из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ с толщинами $d_{Al} = d_{Bi} = 1,4$ мм и $d_{W_{77,7}Cu_{22,3}} = 1,5$ мм составляют 2,0 ГэВ 3,16 и 4,77 ГэВ соответственно.

Представленные в табл. 1, 2 результаты обычно описываются известной формулой Бете–Блоха [8, 11], согласно которой основные потери энергии ионов с $E > 2$ МэВ/нуклон в веществе связаны с ионизационными потерями. Исходя из формулы Бете–Блоха, ионизационные потери пропорциональны квадрату заряда ядра частицы (Z_i) и заряду ядра атомов материала Z . Следовательно, пробеги ТЗЧ уменьшаются в случаях более тяжелых ТЗЧ и материалов среды с большими значениями Z .

Т а б л и ц а 1. Линейные и массовые пробеги протонов в алюминии, оксиде алюминия, висмуте и композите

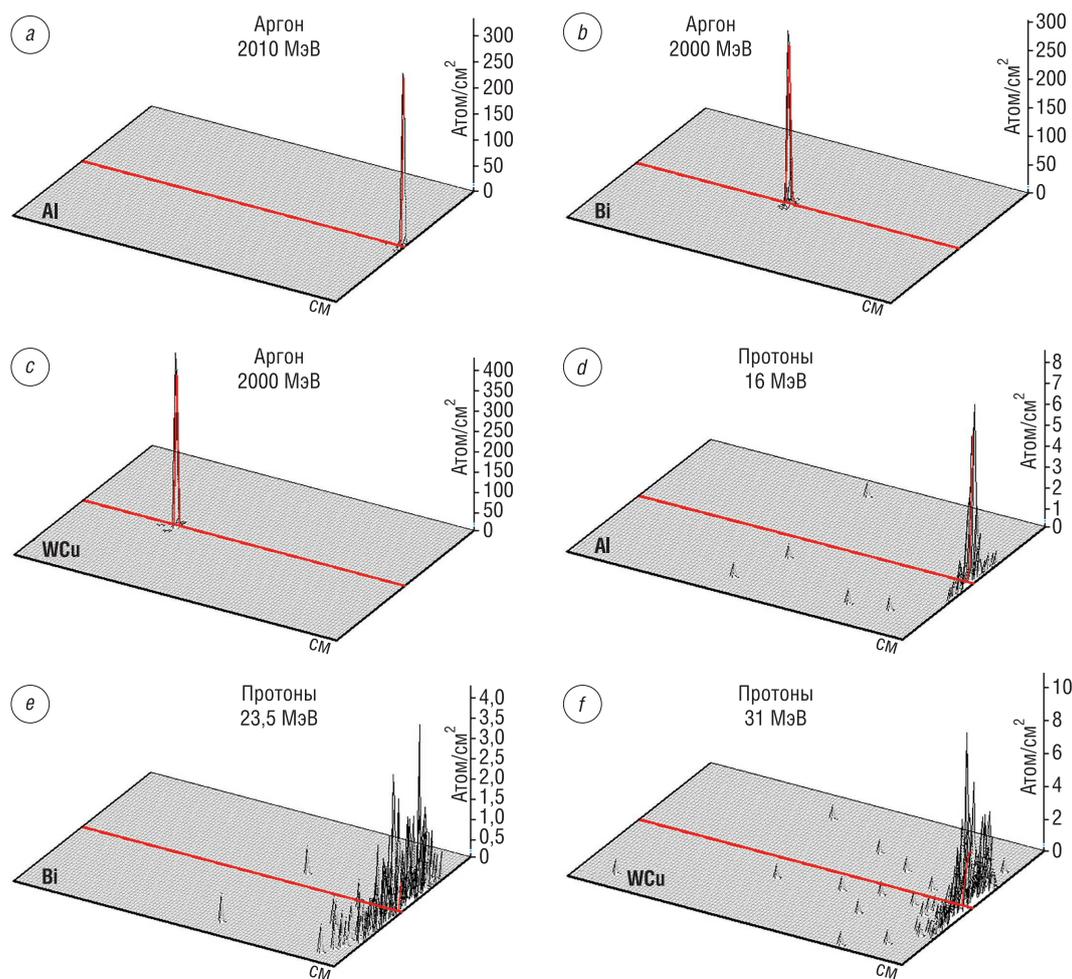
T a b l e 1. Proton linear and mass paths in aluminum, alumina, bismuth, and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite

E , МэВ	Al, $Z = 13$		Al ₂ O ₃ , $Z = 13; 8$		Bi, $Z = 83$		W _{77,7} Cu _{22,3} , $Z = 74; 29$	
	R , см	R_m , г/см ²	R , см	R_m , г/см ²	R , см	R_m , г/см ²	R , см	R_m , г/см ²
10	0,063	0,167	0,039	0,153	0,035	0,345	0,019	0,279
15	0,127	0,343	0,080	0,313	–	–	0,036	0,541
16	0,136	0,367	–	–	–	–	–	–
20	–	–	0,133	0,518	0,109	1,068	0,058	0,870
23,5	–	–	–	–	0,135	1,323	–	–
31	–	–	–	–	–	–	0,116	1,752

Т а б л и ц а 2. Линейные и массовые пробеги высокоэнергетических ионов аргона в алюминии, оксиде алюминия, висмуте и композите $W_{77,7}Cu_{22,3}$ T a b l e 2. Argon ions linear and mass paths in aluminum, alumina, bismuth, and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite

$E, \text{ГэВ}$	Al, $Z = 13$		$Al_2O_3, Z = 13; 8$		Bi, $Z = 83$		$W_{77,7}Cu_{22,3}, Z = 74; 29$	
	$R, \text{см}$	$R_m, \text{г/см}^2$	$R, \text{см}$	$R_m, \text{г/см}^2$	$R, \text{см}$	$R_m, \text{г/см}^2$	$R, \text{см}$	$R_m, \text{г/см}^2$
1,0	0,046	0,123	0,028	0,109	0,023	0,229	0,012	0,187
1,4	0,077	0,207	0,049	0,189	–	–	–	–
2,0	0,139	0,375	0,088	0,342	0,067	0,655	0,036	0,539
2,6	–	–	0,139	0,542	0,098	–	–	–
3,16	–	–	–	–	0,139	1,362	–	–
4,77	–	–	–	–	–	–	0,148	2,235

Профили распределения высокоэнергетических ионов углерода, неона, аргона, криптона и ксенона в исследуемых материалах имеют ярко выраженный пик, так называемый пик Брэгга (рис. 1) [14]. Природа пика Брэгга связана с характером распределения поглощенной энергии вдоль линии пробега в веществе. Основной эффект поглощения энергии происходит в конце линейного пробега частицы, а сечение этого процесса растет с падением энергии, вследствие чего основную часть энергии частица теряет перед моментом остановки. Профили распределения протонов имеют совершенно другой вид (рис. 1 *d–f*) – поток частиц рассеивается по различным направлениям.

Рис. 1. Гистограммы распределения ионов аргона (*a–c*) и протонов (*d–f*) в экранах из алюминия (*a, d*), висмута (*b, e*) и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ (*c, f*)Fig. 1. Argon ions (*a–c*) and protons (*d–f*) histograms of the distribution in shields from aluminum (*a, d*), bismuth (*b, e*) and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite (*c, f*)

На траекторию движения протонов существенное влияние оказывают эффекты многократного рассеяния. Отклонение частицы от первоначального направления пропорционально числу столкновений, зависит от порядкового номера и энергии ТЗЧ.

Полученные результаты обусловлены механизмами взаимодействия высокоэнергетических ионов с веществом и связанными с ними потерями энергии ТЗЧ (упругие столкновения с атомами вещества $E < 10^4$ эВ, ионизационные потери при $E = 10^4 - 10^8$ эВ и потери на ядерные реакции при $E > 100$ МэВ/нуклон [11]). На рис. 2 представлены спектры потерь на ионизацию (a) и ядерные реакции (b) при прохождении протонов с энергией 22,5 МэВ и ионов криптона с энергией 9,23 ГэВ через висмут толщиной 1,4 мм. Видно, что для протонов и ионов аргона вклад в энергетические потери от процесса ионизации значительно выше ($\sim 10^2 - 10^3$), чем вклад от ядерных реакций.

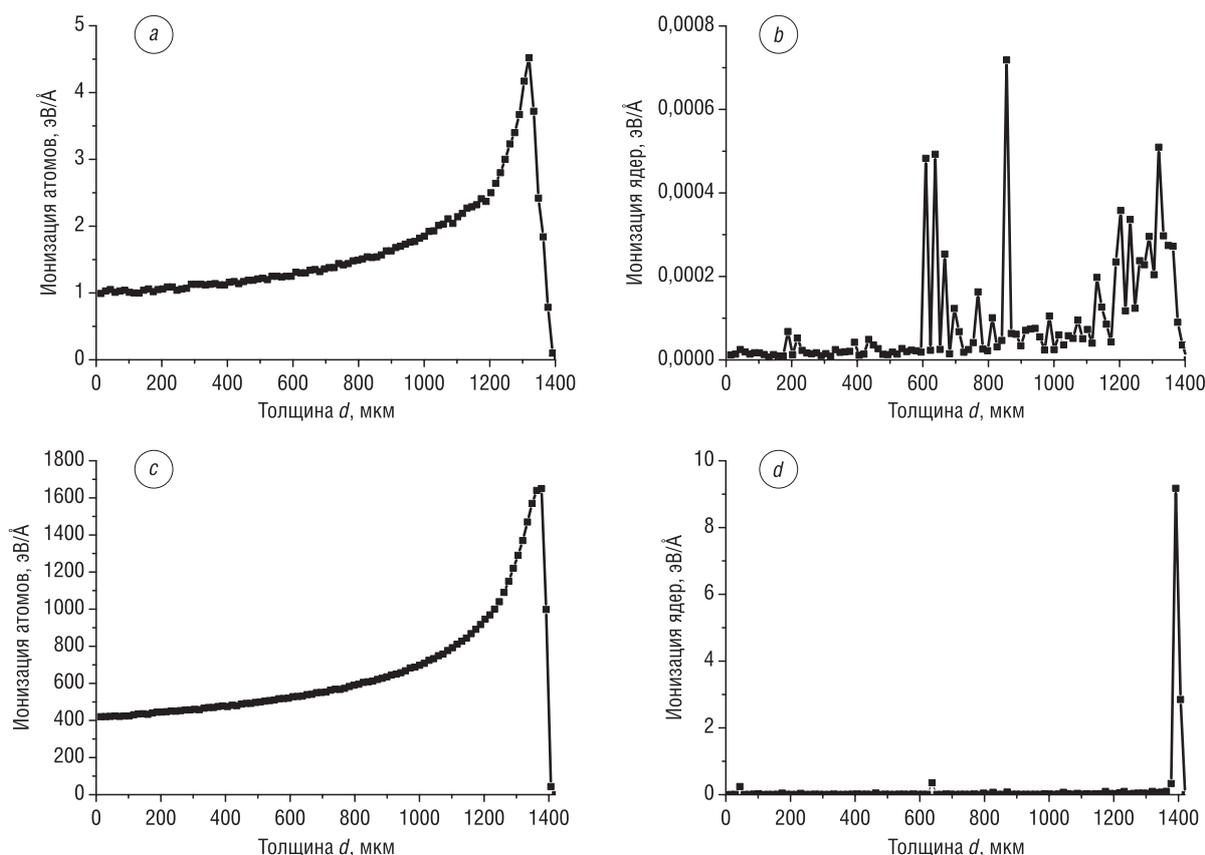


Рис. 2. Спектры потерь на ионизацию (a, c) и ядерные реакции (b, d) при прохождении протонов с энергией 22,5 МэВ (a, b) и ионов криптона с энергией 9,23 ГэВ (c, d) через висмут толщиной 1,4 мм

Fig. 2. The spectra of ionization losses (a, c) and nuclear reactions (b, d) during the protons transmission with 22.5 MeV (a, b) energy and krypton ions with 9.23 GeV energy (c, d) through bismuth with 1.4 mm thick

Для экранов радиационной защиты большой интерес представляет параметр пороговая энергия ионов ($E_{\text{пор}}$), при которой длина линейного пробега равна толщине экрана. Выполненные расчеты пробегов высокоэнергетических протонов, ионов гелия, углерода, неона, аргона, железа, криптона и ксенона в экранах из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ позволили построить зависимости $E_{\text{пор}}$ от порядкового номера ТЗЧ (рис. 3). Как видно из приведенных данных, наиболее высокой эффективностью с позиции линейных пробегов частиц обладают экраны на основе композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$. Значения пороговых энергий для этого материала толщиной 1,5 мм (массовая толщина 2,26 г/см²) при воздействии потоков протонов и ионов He^+ , C^+ , Ne^+ , Ar^+ , Fe^+ , Kr^+ и Xe^+ составляют 37 МэВ; 480; 790; 1780; 4770; 7900; 14200 и 27000 МэВ соответственно. Зависимость пороговой энергии от линейной толщины композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ для ионов аргона представлена на рис. 4.

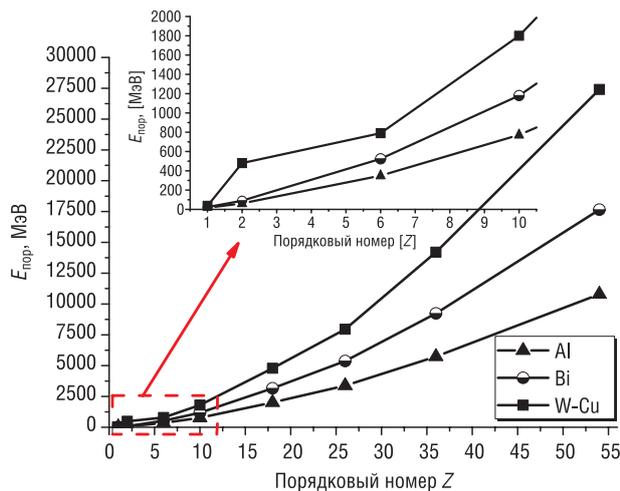


Рис. 3. Пороговая энергия экранов из алюминия, висмута и композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ толщиной 1,5 мм для протонов, ионов гелия, углерода, неона, аргона, железа, криптона и ксенона

Fig. 3. Threshold energy of aluminum, bismuth, and $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite shields with 1.5 mm thickness for protons, helium, carbon, neon, argon, iron, krypton and xenon ions

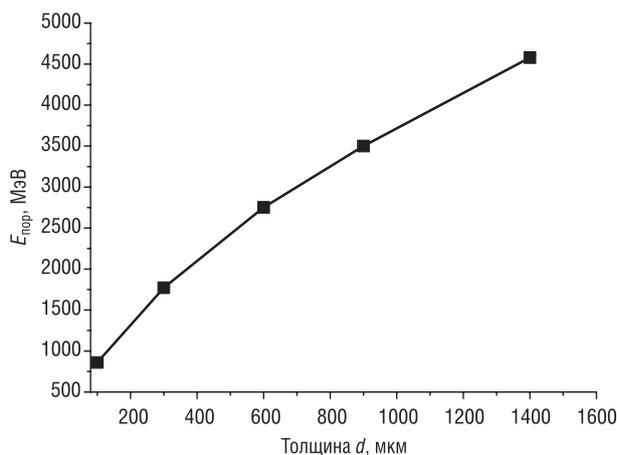


Рис. 4. Зависимость пороговой энергии от толщины экранов из композита $W_{77,7}Cu_{22,3}$ для ионов аргона

Fig. 4. Dependence of threshold energy on the $W_{77,7}Cu_{22,3}$ composite thickness for argon ions

Пробеги высокоэнергетических ионов и потери энергии в многослойных структурах системы $Bi/Al/Al_2O_3$. Влияние многослойности в экранах, а именно последовательности расположения и толщины слоев, на эффективность защиты от высокоэнергетических ионов исследовалось на структурах системы $Bi/Al/Al_2O_3$. В качестве воздействующих частиц были выбраны ионы криптона ($Z = 36$) с повышенным вкладом процессов ионизации в суммарные потери энергии. Рассчитанные зависимости линейных пробегов ионов криптона от количества и очередности расположения слоев легких и тяжелых элементов в многослойных структурах $Bi/Al/Al_2O_3$ представлены на рис. 5. Для сравнения на там же приведены результаты моделирования по однослойным экранам из алюминия и висмута. С позиции полученных при моделировании линейных пробегов частиц среди рассмотренных материалов наименее эффективны экраны из алюминия, наиболее эффективны – из висмута, средней эффективностью обладают многослойные структуры.

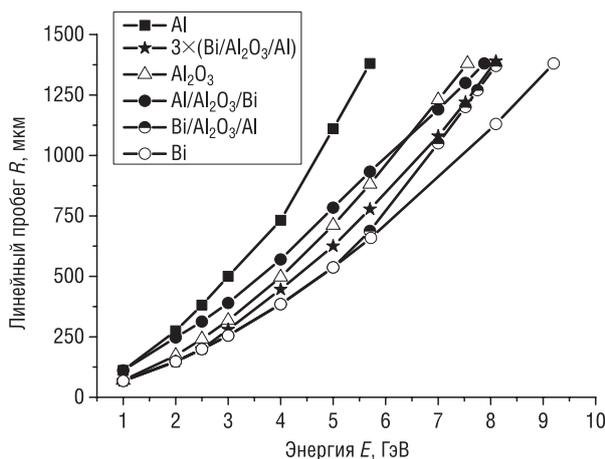


Рис. 5. Зависимости линейных пробегов от энергии ионов криптона в трехслойных структурах $Bi/Al_2O_3/Al$ и $Al/Al_2O_3/Bi$; девятислойной структуре $Bi/Al_2O_3/Al/Bi/Al_2O_3/Al/Bi/Al_2O_3/Al$; однослойных экранах из алюминия и висмута

Fig. 5. Dependences of linear paths on the energy of krypton ions in three-layered $Bi/Al_2O_3/Al$ and $Al/Al_2O_3/Bi$ structures; nine-layered structure $Bi/Al_2O_3/Al/Bi/Al_2O_3/Al/Bi/Al_2O_3/Al$; single-layered aluminum and bismuth shields

В трехслойных структурах системы $Bi/Al/Al_2O_3$ характер зависимостей $R = R(E)$ определяется очередностью расположения отдельных слоев.

В случае структуры $Bi/Al/Al_2O_3$ зависимость $R = R(E)$ вплоть до пробегов 0,6 мм ($E \sim 5,4$ ГэВ) совпадает с аналогичной зависимостью для чистого висмута, поскольку данный пробег соответствует толщине висмутного слоя многослойной структуры. При энергиях $E > 5,4$ ГэВ ТЗЧ проникают в слои Al_2O_3 и Al , тормозная способность которых ниже, чем у висмута, вследствие чего эффективность экранов $Bi/Al/Al_2O_3$ при энергиях $E > 5,4$ ГэВ ниже, чем у экранов из чистого висмута. Пороговая энергия для таких структур составляет 8,1 ГэВ.

В случае структуры $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}$ начальная точка на графике $R = R(E)$ соответствует линейному пробегу 0,2 мм ($E = 2$ ГэВ) и равна толщине алюминиевого слоя. Поэтому эта точка совпадает с аналогичной для чистого алюминия. При дальнейшем увеличении энергии за счет больших потерь в слое Al_2O_3 кривая $R = R(E)$ многослойной структуры опускается ниже кривой чистого алюминия. Висмутовый слой усиливает эту тенденцию и при конечной толщине 1,4 мм линейный пробег приближается к значениям пробегов для структуры $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Пороговая энергия для данных структур составляет 7,9 ГэВ.

В случае девятислойной структуры $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ большое количество слоев и их малые толщины нивелируют эффекты различного поглощения энергии отдельными слоями. Можно заключить, что с увеличением количества слоев зависимость линейных пробегов от энергии ионов приближается к аналогичной для экрана из эквивалентного трехслойного материала $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$. Поэтому зависимость $R = R(E)$ для девятислойной структуры располагается между аналогичными кривыми структур $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}$.

Для системы $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Bi}$ значению $R = 0,8$ мм, которое соответствует толщине двух слоев Al и Al_2O_3 , требуется энергия ионов порядка 5,2 ГэВ, а значению $R = 1,4$ мм – энергия 7,9 ГэВ. Поэтому для прохождения висмутового слоя ионами понадобилась дополнительная энергия $E = 2,7$ ГэВ. Для системы $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ значению $R = 0,6$ мм, которое соответствует толщине слоя висмута, требуется энергия ионов порядка 5,4 ГэВ, а значению $R = 1,4$ мм – 8,1 ГэВ. Следовательно, для прохождения слоев Al и Al_2O_3 потребовалась дополнительная энергия 2,8 ГэВ. Различный уровень поглощения энергии слоями трехслойной структуры в зависимости от их последовательности подтверждается спектрами потерь на ионизацию, рассчитанными при прохождении протонов с энергией 20 МэВ (*a*, *b*) и ионов криптона с энергией 7,75 ГэВ (*c*, *d*) через многослойные структуры $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Bi}$ с общей толщиной 1,4 мм (рис. 6).

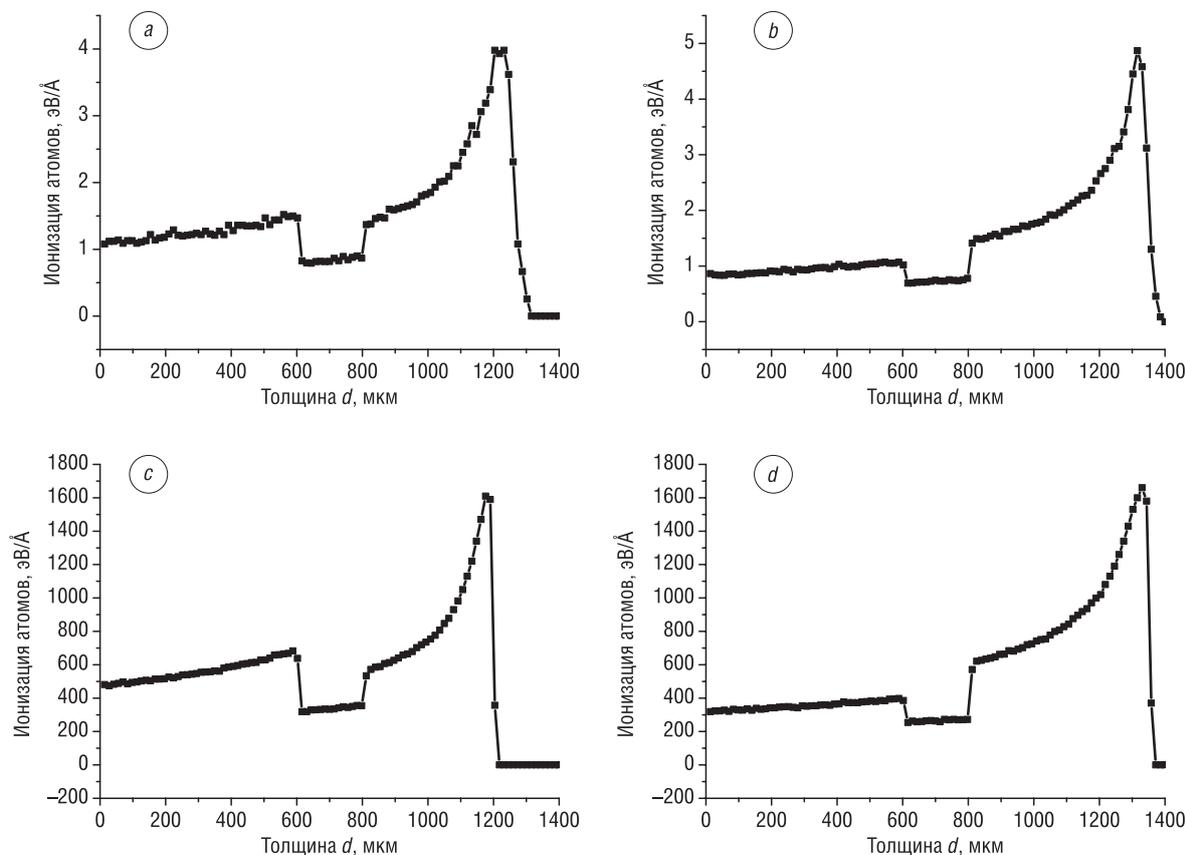


Рис. 6. Спектры потерь на ионизацию при прохождении протонов с энергией 20 МэВ (*a*, *b*) и ионов криптона с энергией 7,75 ГэВ (*c*, *d*) через многослойные структуры $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (*a*, *c*) и $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Bi}$ (*b*, *d*) толщиной 1,4 мм

Fig. 6. The ionization losses spectra for the transmissions of protons with 20 MeV (*a*, *b*) energy and krypton ions with 7.75 GeV (*c*, *d*) energy through the $\text{Bi}/\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (*a*, *c*) and $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}/\text{Bi}$ (*b*, *d*) multilayered structures with 1.4 mm thickness

Из данных, представленных на рис. 6, видно, что потери на ионизацию как для протонов, так и для ионов криптона в случае многослойной структуры, первый слой которой содержит тяжелый элемент (Bi), выше, чем в случае, когда первый слой состоит из легких элементов (Al, Al₂O₃). Необходимо также отметить, что энергии протонов 20 МэВ и ионов криптона 7,75 ГэВ практически достаточно для прохождения высокоэнергетическими частицами многослойной структуры Al₂O₃/Al/Bi, но недостаточно для прохождения структуры Bi/Al/Al₂O₃.

Таким образом, в трехслойных структурах системы Bi/Al/Al₂O₃ характер зависимостей $R(E)$ и ионизационные потери энергии определяются очередностью расположения отдельных слоев, что можно объяснить различным уровнем потерь на ионизацию в слоях, содержащих тяжелые и легкие элементы. Поэтому более эффективными защитными свойствами среди многослойных экранов по отношению к монохроматическим и высокоэнергетическим ионам обладают структуры, в которых первый слой содержит более тяжелый элемент. Для системы Bi/Al₂O₃/Al – это слой висмута. Увеличение количества слоев не способствует повышению эффективности экранирования высокоэнергетических ионов. Похожие результаты были получены в [15]. Расчет в программе GEANT3 спектров протонов с энергией 6 МэВ при прохождении двухслойных экранов W/Al с толщинами отдельных слоев по 50 мкм показал, что характер преобразования спектров протонов зависит от материала первого слоя. Основное преобразование спектра протонов происходит в слое тяжелого элемента, поэтому изменения относительных потоков энергии протонов после прохождения экранов W/Al и Al/W составляли 0,275 и 0,318 единиц соответственно. С увеличением количества слоев до 10 относительный поток энергии прошедших ионов приближался к 0,305, что аналогично сплаву W/Al.

Выводы

1. Рассчитаны линейные и массовые пробеги протонов и ионов аргона в экранах из алюминия, оксида алюминия, висмута и композита W_{77,7}Cu_{22,3}. Показано, что эффективность защиты от высокоэнергетических ионов материалами с большими значениями заряда ядер атомов Z выше с позиции линейных пробега частиц и ниже с позиции массовых пробега, чем материалов с низкими значениями Z .

2. Определена зависимость пороговой энергии от порядкового номера ТЗЧ для экранов из алюминия, висмута и композита W_{77,7}Cu_{22,3}, согласно которой наиболее высокой эффективностью с позиции линейных пробега частиц обладают экраны на основе композита W_{77,7}Cu_{22,3}. Значения пороговых энергий для этого материала толщиной 1,5 мм (2,55 г/см²) при воздействии потоков протонов и ионов He⁺, C⁺, Ne⁺, Ar⁺, Fe⁺, Kr⁺ и Xe⁺ составляют 37 МэВ; 480; 790; 1780; 4770; 7900; 14 200 и 27 000 МэВ соответственно.

3. Расчет спектров потерь на ионизацию при прохождении как протонов с энергией 20 МэВ, так и ионов криптона с энергией 7,75 ГэВ через многослойные структуры Bi/Al/Al₂O₃ и Al/Al₂O₃/Bi показал, что торможение высокоэнергетических частиц в случае, когда первый слой содержит тяжелый элемент, выше, чем в случае, когда первый слой содержит легкий элемент.

4. Изучено влияние последовательности в расположении и толщины слоев в многослойных структурах системы Bi/Al/Al₂O₃ на эффективность защиты от высокоэнергетических ионов. Показано, что характер зависимостей $R(E)$ и потерь энергии ионов определяются очередностью расположения отдельных слоев, что связано с различием преобразования спектров материалом первого слоя. Более значительные изменения спектров происходят в слое с тяжелым элементом, поскольку ионизационные потери в нем выше, и более высокий уровень ослабления потока энергии соответствует случаю чередования слоев экрана тяжелый элемент/легкий элемент.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии» подпрограммы «Наноматериалы и нанотехнологии» (задание 2.34), Белорусского фонда фундаментальных исследований (БРФФИ–ОИЯИ №Ф18Д-007), гранта Международной ассоциации ученых (г. Женева, Швейцария).

Acknowledgements

The work was carried out with financial support of State program of scientific research “Physical Materials Science, New Materials and Technologies” subprogram “Nanomaterials and Nanotechnologies” (task 2.34), Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (BRFFR–JINR Grant No. Ф18Д-007), Grant of World Federation of Scientists (Geneva, Switzerland).

Список использованных источников

1. Белоус, А. И. Космическая электроника / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М.: Техносфера, 2015. – Кн. 2. – 732 с.
2. В борьбе с радиацией / Н. А. Василенков [и др.] // Российский космос. – 2015. – № 5 (113). – С. 38–41.
3. RAD-COAT protection [Electronic resource] // SpaceElectronics. – Mode of access: <http://www.spaceelectronics.com> – Date of access: 03.09.2019.
4. RAD-PAK protection [Electronic resource] // Maxwell Technologies, Inc. – Mode of access: <http://www.maxwell/products/microelectronics> – Date of access: 03.09.2019.
5. WALOPACK protection [Electronic resource] // 3D plus electronics. – Mode of access: <http://www.3d-plus.com/> – Date of access: 03.09.2019.
6. Гульбин, В. Н. Разработка композиционных материалов, модифицированных нанопорошками, для радиационной защиты в атомной энергетике / В. Н. Гульбин // Физикохимия ультрадисперсных (нано-) систем – 2010: материалы IX Всерос. конф. – Ижевск, 2010. – С. 12–28.
7. Новые материалы локальной радиационной защиты / Г. Ефремов [и др.] // Физика и химия обработки материалов. – 2003. – № 1. – С. 34–37.
8. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г. Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
9. Гальпер, А. М. Радиационный пояс Земли / А. М. Гальпер // СОЖ. – 1999. – № 6. – С. 75–81.
10. Мирошниченко, Л. И. Космические лучи в межпланетном пространстве / Л. И. Мирошниченко. – М.: Наука, 1973. – 160 с.
11. Новиков, Л. С. Радиационные воздействия на материалы космических аппаратов: учеб. пособие / Л. С. Новиков. – М.: Университет. кн., 2010. – 192 с.
12. Модель космоса / под ред. М. И. Панасюка. – М.: КДУ, 2007. – Т. 1. – 872 с.
13. SRIM-2013 [Electronic resource] / James Ziegler. – Mode of access: <http://www.srim.org> – Date of access: 03.09.2019.
14. Егранов, А. В. Методы экспериментальной физики конденсированного состояния: учеб. пособие / А. В. Егранов. – Иркутск: Иркут. гос. ун-т, 2013. – Ч. 2: Взаимодействие ионизирующих излучений с веществом. – 115 с.
15. Математическое моделирование свойств неоднородных структур для систем радиационной защиты / Н. П. Чирская [и др.] // Радиационная физика твердого тела: тр. XXI Междунар. конф. – М.: ГНУ «НИИПМТ», 2011. – Т. 2. – С. 436–443.

References

1. Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V. *Space Electronics*. Moscow, Technosfera Publ., 2015. 732 p. (in Russian).
2. Vasilenkov N. A., Grabchikov S. S., Maksimov A. Y., Lastovskii S. B. In the fight against radiation. *Rossiiskii kosmos* [Russian Space], 2015, no. 5, pp. 38–41 (in Russian).
3. RAD-COAT protection. *SpaceElectronics*. Available at: <http://www.spaceelectronics.com> (accessed 3 September 2019).
4. RAD-PAK protection. *Maxwell Technologies, Inc.* Available at: <http://www.maxwell/products/microelectronics> (accessed 3 September 2019).
5. WALOPACK protection. *3D plus electronics*. Available at: <http://www.3d-plus.com> (accessed 3 September 2019).
6. Gulbin V. N. The development of composite materials modified with nanopowders for radiation protection in nuclear power. *Fizikochimiya ultradispersnih (nano-) system – 2010: materialy IX Vserossiiskoi konferencii* [Physicochemistry of ultrafine (nano) systems – 2010: Proceedings of the IX All-Russian Conference]. Izevsk, 2010, pp. 12–28 (in Russian).
7. Efremov G. A., Yepifanovskiy I. S., Shirayayev A. V., Zabolotnyy V. T., Mileev V. N., Novikov L. S. New materials of local radiation protection. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2003, no. 1, pp. 34–37 (in Russian).
8. Raikunov G. G. (ed.). *Ionizing Radiation of Outer Space and their Impact on the Onboard Equipment of Spacecraft*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 256 p. (in Russian).
9. Galper A. M. Earth Radiation Belt. *Sorosovskii obrazovatel'nyi zhurnal = Soros Educational Journal*, 1999, no. 6, pp. 75–81 (in Russian).
10. Miroshnichenko L. I. *Space Rays in Interstellar Space*. Moscow, Nauka Publ., 1973. 160 p. (in Russian).
11. Novikov L. S. *Radiation Impact on the Space Aircrafts Materials*. Moscow, Universitetskaya kniga Publ., 2010. 192 p. (in Russian).
12. Panasuk M. I. (ed.). *Model of Space*. Moscow, KDU Publ., 2007. 872 p. (in Russian).
13. Ziegler J. *SRIM-2013*. Available at: <http://www.srim.org>. (accessed 3 September 2019).
14. Egranov A. V. *Methods of Experimental Condensed Matter Physics. Part 2: Interaction of Ionizing Radiation with Matter*. Irkutsk, Irkutsk State University, 2013. 115 p. (in Russian).
15. Chirskaya N. P., Voronina E. N., Mileev V. N., Novikov L. S., Sinolits V. V. Mathematical modeling of the properties of heterogeneous structures for radiation protection systems. *Radiatsionnaya fizika tverdogo tela: trudy XXI Mezhdunarodnoi konferentsii. T. 2* [Solid State Radiation Physics: Proceedings of the 21 International Conference. Vol. 2]. Moscow, 2011, pp. 436–443 (in Russian).

Информация об авторах

Грabcиков 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

Грabcикова Елена Александровна – младший 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: grabchikova_e@bk.ru

Васин Денис Сергеевич – младший 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: d.s.vasin@outlook.com

Тишкевич Дарья Ивановна – кандидат физико-математических наук, старший 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: dashachushkova@gmail.com

Ластовский Станислав Брониславович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Якушевич Анна Сергеевна – младший научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by

Богатырев Юрий Владимирович – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogat@physics.by

Калагин Игорь Владимирович – кандидат технических наук, начальник научно-технологического отдела ускорителей лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований (ул. Ж. Кюри, 6, 141980, Дубна, Российская Федерация). E-mail: kalagin@jinr.ru

Митрофанов Семен Вячеславович – начальник группы радиоактивных пучков научно-технологического отдела ускорителей лаборатории ядерных реакций имени Г.Н. Флерова, Объединенный институт ядерных исследований (ул. Ж. Кюри, 6, 141980, Дубна, Российская Федерация). E-mail: mitrofanov@jinr.ru

Information about the authors

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

Elena A. Grabchikova – Junior Researcher of the Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: grabchikova_e@bk.ru

Denis S. Vasin – Junior Researcher of the Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: d.s.vasin@outlook.com

Daria I. Tishkevich – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Physics of Magnetic Films Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dashachushkova@gmail.com

Stanislav B. Lastovski – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lastov@ifftp.bas-net.by

Anna S. Yakushevich – Junior Researcher of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: yakushevich@ifftp.bas-net.by

Yrii V. Bogatyrev – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher of the Radiation Effects Laboratory, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogat@physics.by

Igor V. Kalagin – Ph. D. (Engineering), Head of the Scientific and Technological Department of Accelerators of the Laboratory of Nuclear Reactions named after G.N. Flerov, Joint Institute of Nuclear Research (6, J. Curie Str., 141980, Dubna, Russian Federation). E-mail: kalagin@jinr.ru

Semen V. Mitrofanov – Head of the Group of Radioactive Beams of the Scientific and Technological Department of Accelerators of the Laboratory of Nuclear Reactions named after G.N. Flerov, Joint Institute of Nuclear Research (6, J. Curie Str., 141980, Dubna, Russian Federation). E-mail: mitrofanov@jinr.ru

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.382

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-35-42>

Поступила в редакцию 23.04.2019

Received 23.04.2019

А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Н. Ю. Мельник*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь***СПЛАВЫ СИСТЕМЫ Cr–Ni–Si ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ МЕТОДОМ МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ**

Аннотация. Представлены результаты исследования влияния режимов термообработки на удельное поверхностное сопротивление (УПС) и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) резистивных пленок, полученных из мишеней системы Cr–Ni–Si методом магнетронного распыления. На основании обобщения экспериментальных данных предложена диаграмма состав–УПС пленок системы Cr–Ni–Si толщиной 100 нм. Установлено, что резистивные пленки системы Cr–Ni–Si, нанесенные методом магнетронного распыления на кремниевые полупроводниковые пластины с подслоем SiO₂, при толщине 100 нм имеют УПС до 350 Ом/кв. Показано, что для изготовления мишеней магнетронных распылительных систем (МРС) методом литья необходимо снизить температуру плавления и хрупкость сплавов, то есть определить их эвтектические составы. Проведены расчеты и установлено, что эвтектики в системе Cr–Ni–Si содержат 36,4 и 38,5 ат.% Ni, что в 4–6 раз выше, чем у сплавов серии РС этой системы. В связи с большим содержанием Ni УПС пленок эвтектических составов толщиной 100 нм находится в диапазоне от 100 до 200 Ом/кв. Отмечено, что для повышения УПС резистивных пленок и снижения температуры плавления сплавов целесообразна разработка новых четырех- и пятикомпонентных сплавов на основе системы Cr–Ni–Si с введением в нее тугоплавких (Mo, Nb) и редкоземельных (La, Y) элементов.

Ключевые слова: резистивные сплавы, мишени, электрические свойства, резистивные пленки, магнетронное распыление

Для цитирования: Волочко, А. Т. Сплавы системы Cr–Ni–Si для получения резистивных элементов интегральных микросхем методом магнетронного распыления / А. Т. Волочко, В. А. Зеленин, Н. Ю. Мельник // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 35–42. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-35-42>

Alexander T. Volochko, Victor A. Zelenin, Natalia Yu. Melnik*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus***ALLOYS OF THE Cr–Ni–Si SYSTEM FOR OBTAINING RESISTIVE ELEMENTS OF INTEGRATED MICROCIRCUITS BY MAGNETRON SPUTTERING**

Abstract. This article presents the results of the study of the effect of annealing on the sheet resistivity and temperature coefficient of resistance (TCR) of resistive films obtained from targets of the Cr–Ni–Si system using magnetron sputtering. A diagram of the composition–sheet resistivity of the Cr–Ni–Si system films with a thickness of 100 nm is proposed. It was established that resistive films of the Cr–Ni–Si system deposited by magnetron sputtering on silicon semiconductor plates with a SiO₂ sublayer with a thickness of 100 nm, have sheet resistivity up to 350 Ω/square. It is shown that it is necessary to determine their eutectic compositions for the manufacture of targets by casting. Calculations were carried out and it was established that eutectics of the Cr–Ni–Si system contain 36.4 and 38.5 at% Ni, which is 4 to 6 times higher than in the PC series alloys of this system. Due to the high content of Ni sheet resistivity films of eutectic compositions with a thickness of 100 nm is in the range from 100 to 200 Ω/square. It was noted that it is necessary to develop new four-five-component alloys based on the Cr–Ni–Si system with the introduction of refractory (Mo, Nb) and rare-earth (La, Y) elements into it, in order to increase the sheet resistivity of films and to decrease the melting temperature of alloys.

Keywords: resistive alloys, targets, electrical properties, resistive films, magnetron sputtering

For citation: Volochko A. T., Zelenin V. A., Melnik N. Yu. Alloys of the Cr–Ni–Si system for obtaining resistive elements of integrated microcircuits by magnetron sputtering. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-texnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 35–42 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-35-42>

Введение. Особое место среди резистивных материалов занимают силициды, позволяющие получать резистивные пленки в широком диапазоне удельных сопротивлений [1]. Электропроводность пленок уменьшается с увеличением концентрации кремния, поскольку

наличие ковалентных связей металл–кремний уменьшает концентрацию свободных электронов и увеличивает удельное сопротивление. Диапазон удельных сопротивлений резистивных пленок, необходимых для решения большинства проблем, связанных с изготовлением резистивных элементов интегральных микросхем (ИМС), практически перекрыт сплавами серии РС, но не все они технологичны, что касается изготовления мишеней. Основными требованиями, которые предъявляются к мишеням для магнетронного распыления, являются отсутствие быстродиффундирующих в кремнии элементов (Fe, Cu и др.), однородная мелкозернистая структура сплава, низкая пористость, отсутствие трещин и неметаллических включений.

Используемые в настоящее время резистивные сплавы и мишени из них содержат в качестве основных компонентов силициды хрома, имеющие значительно более высокое удельное сопротивление по сравнению с силицидами большинства металлов [2]. Наиболее широко для нанесения резистивных пленок используются сплавы систем Cr–Ni–Si и Cr–Co–Si. Однако мишени из них, полученные методами порошковой металлургии, как правило, содержат большое количество кислорода, имеют высокую пористость и неупорядоченную структуру и вследствие этого не удовлетворяют вышеперечисленным требованиям.

Зависимость электрических свойств от технологических факторов для резистивных сплавов системы Cr–Ni–Si для пленок, полученных методом термического испарения, представлены в [3]. Так как метод термического испарения заменяется более технологичным методом магнетронного распыления, существует необходимость в установлении зависимости электрических свойств от технологических факторов для пленок, полученных методом магнетронного распыления.

Целью работы являлось исследование влияния режимов термообработки на удельное поверхностное сопротивление (УПС) и температурный коэффициент сопротивления (ТКС) резистивных пленок, полученных методом магнетронного распыления литых мишеней системы Cr–Ni–Si.

Для достижения цели решены следующие задачи:

проведен анализ составов известных резистивных сплавов серии РС, относящихся к системе Cr–Ni–Si;

проведены расчеты эвтектических составов сплавов этой системы, позволяющие снизить температуру плавления, получить мелкозернистую структуру отливок и тем самым снизить вероятность их растрескивания;

получены образцы мишеней из силицидных сплавов, удовлетворяющие предъявляемым требованиям;

исследовано влияние температуры отжига на УПС и ТКС резистивных пленок;

построена диаграмма состав–УПС резистивных пленок системы Cr–Ni–Si.

Анализ составов резистивных сплавов системы Cr–Ni–Si. Для изготовления резисторов с широким диапазоном поверхностного сопротивления от 10 до 10^4 Ом/кв разработаны резистивные сплавы серии РС [2]. Составы и некоторые свойства применяемых в промышленности стандартных резистивных сплавов системы Cr–Ni–Si приведены в таблице.

Предварительное заключение о литейных свойствах сплавов можно сделать на основании их положения на диаграммах состояния систем Cr–Si и Ni–Si, приведенных на рис. 1 и 2.

Как следует из рис. 1, разброс температур плавления рассматриваемых сплавов составляет около 200 °С. Анализ расположения сплавов (по концентрации Si) на диаграмме состояния Cr–Si

свидетельствует о том, что при более высоком содержании кремния в сплаве РС-4206 температура его плавления была бы ближе к эвтектической (1305 °С).

Анализ расположения резистивных сплавов на диаграмме состояния Ni–Si показал, что в сплаве РС-4206 при затвердевании формируется высокотемпературная модификация β -NiSi₂, которая при последующем остывании при температуре 980 °С превращается в низкотемпературную α -NiSi₂, что повышает уровень механических напряжений в отливках

Составы и параметры резистивных сплавов системы Cr–Ni–Si

Compositions and parameters of resistive alloys of the Cr–Ni–Si system

Сплав	Температура плавления, °С	Удельное сопротивление, ρ , 10^{-6} Ом·м	ТКС, 10^{-4} К ⁻¹	Состав, ат.%		
				Cr	Ni	Si
РС-5406Н	1400	2,5–3	6–9	37,2	4,7	58,1
РС-4206	1460	–	–	26,5	4,3	69,2
РС-3710	1250	5–7	15–25	35,2	8,4	56,4

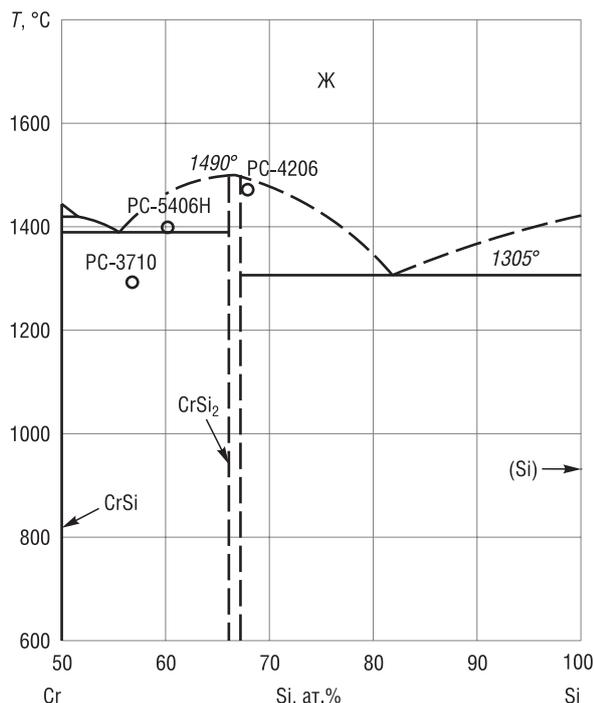


Рис. 1. Условное расположение сплавов PC на диаграмме состояния системы Cr–Si (по содержанию Si)

Fig. 1. Conditional location of PC alloys on the equilibrium diagram Cr–Si systems (according to Si content)

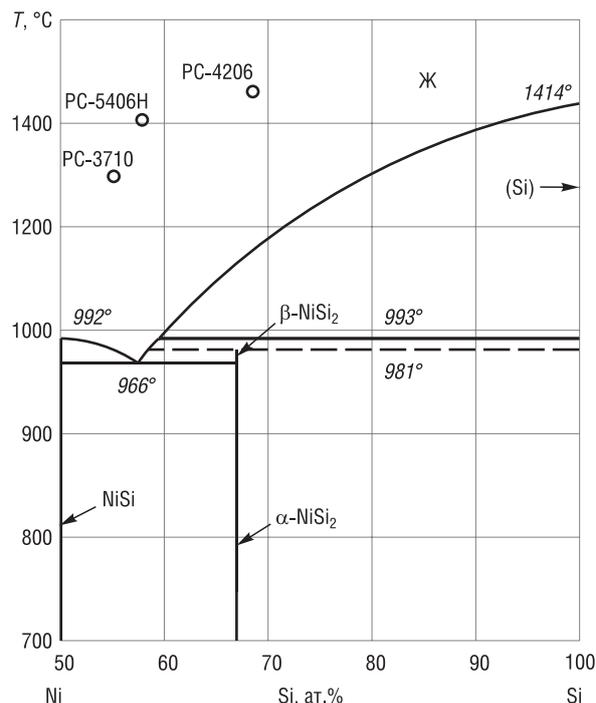


Рис. 2. Условное расположение сплавов PC на диаграмме состояния системы Ni–Si (по концентрации Si)

Fig. 2. Conditional location of PC alloys on the equilibrium diagram Ni–Si systems (according to Si content)

и приводит к их растрескиванию. В связи с этим высококремнистые сплавы с никелем для изготовления мишеней должны иметь температуру плавления не выше 980 °С. Этому требованию, по соотношению Ni и Si, больше всего отвечают сплавы PC-3710 и PC-5406H, однако наличие Cr значительно повышает их температуру плавления (рис. 2).

Таким образом, предварительный анализ соответствия требованиям к трещиностойкости резистивных сплавов серии PC по их расположению по отношению к точкам эвтектик на двойных диаграммах состояния показал, что предпочтение следует отдать сплавам PC-3710 и PC-5406H.

Более точное заключение по возможностям повышения работоспособности мишеней из резистивных сплавов можно сделать путем поиска точек эвтектик в тройной системе Cr–Ni–Si. Определение их координат позволит приблизить составы сплавов к эвтектическим и тем самым повысить литейные свойства и предотвратить образование микротрещин при кристаллизации и остывании отливок.

Расчет температур плавления и координат тройных эвтектик в системе Cr–Ni–Si. В [4] предложен метод расчета температур и концентраций элементов в различных двух- и многокомпонентных системах. Исходными данными предложенного метода являются температуры плавления входящих в эвтектики компонентов, которыми могут быть чистые элементы, химические соединения или твердые растворы предельной растворимости.

При поэтапном определении температуры плавления эвтектики многокомпонентной системы $T_{эвт}$ сначала проводят расчет эвтектической температуры компонентов T_1, T_2 , разбитых по парам в порядке убывания температур их плавления:

$$T_{эвт} = K_{эт}(T_1 + T_2), \tag{1}$$

$K_{эт}$ – коэффициент эвтектической температуры.

В [4] для случая сочетания переходных металлов с неметаллами или с промежуточными элементами для определения коэффициентов эвтектической температуры для различных систем предлагают формулу

$$K_{эт} = 0,497 \exp(-0,2657X). \tag{2}$$

Расчет масштабного температурного параметра X , используемого при определении коэффициента эвтектической температуры $K_{\text{эт}}$, проводят согласно выражению

$$X = (T_1 - T_2)/(T_1 + T_2)^{0,74}. \quad (3)$$

Расчет эвтектической концентрации (в мас.%) осуществляют по формулам:

$$C_{\text{эвт}}^{T_1} = [(T_2 - T_{\text{эвт}})/(T_1 + T_2 - 2T_{\text{эвт}})] \times 100 \%; \quad (4)$$

$$C_{\text{эвт}}^{T_2} = [(T_1 - T_{\text{эвт}})/(T_1 + T_2 - 2T_{\text{эвт}})] \times 100 \%. \quad (5)$$

Температуру плавления тройной эвтектики в системе Ni–Cr–Si можно рассчитать, используя в качестве исходных данных температуры плавления эвтектик CrSi₂–CrSi (1380 °C), CrSi₂–Si (1305 °C), а также температуру плавления эвтектики NiSi–NiSi₂ (966 °C) и температуры плавления ее компонентов NiSi (992 °C) и NiSi₂ (993 °C).

Определение температур плавления тройных эвтектик в системе Ni–Cr–Si для сплавов PC-3710 и PC-5406H сводим к расчету двойной системы (CrSi₂–CrSi)_{эвт}–NiSi:

$$\begin{aligned} X &= (1380 - 992)/(1380 + 992)^{0,74} = 1,234; \\ K_{\text{эт}} &= 0,497 \exp(-0,2657 \times 1,234) = 0,358; \\ T_{\text{эвт}} &= 0,358 \times (1380 + 992) = 849,2 \text{ °C}. \end{aligned}$$

Принимая $T_{\text{эвт}} = 850 \text{ °C}$, определяем концентрации элементов в тройной эвтектике:

$$C_{\text{эвт}}^{T_1} = 100 \times (992 - 850)/(2372 - 1700) = 21,1 \text{ мас. \% (CrSi}_2\text{–CrSi)}_{\text{эвт}}.$$

Концентрация NiSi в тройной эвтектике составляет 78,9 мас.% (53,5 мас.% Ni и 25,4 мас.% Si). В 21,1 мас.% эвтектики CrSi₂–CrSi состава 59,3 мас.% Cr и 40,7 мас.% Si содержится 12,5 мас.% Cr и 8,6 мас.% Si.

Таким образом, установлено, что эвтектика в тройной системе Ni–Cr–Si плавится при температуре $T_{\text{эвт}} = 850 \text{ °C}$ и содержит 53,5 мас.% (38,5 ат.%) Ni, 12,5 мас.% (10,2 ат.%) Cr и 34,0 мас.% (51,3 ат.%) Si.

Определение температур плавления тройных эвтектик в системе Ni–Cr–Si для сплава PC-4206 сводим к расчету двойной системы (CrSi₂–Si)_{эвт}–NiSi:

$$\begin{aligned} X &= (1305 - 992)/(1305 + 992)^{0,74} = 1,01926; \\ K_{\text{эт}} &= 0,497 \exp(-0,2657 \times 1,01926) = 0,379; \\ T_{\text{эвт}} &= 0,379 \times (1305 + 992) = 870,8 \text{ °C}. \end{aligned}$$

Принимая $T_{\text{эвт}} = 870 \text{ °C}$, определяем концентрации элементов в тройной эвтектике:

$$C_{\text{эвт}}^{T_1} = 100 \times (992 - 870)/(2297 - 1740) = 21,9 \text{ мас. \% (CrSi}_2\text{–Si)}_{\text{эвт}}.$$

Концентрация NiSi в тройной эвтектике составляет 78,1 мас.% (53,0 мас.% Ni и 25,1 мас.% Si). В 21,9 мас.% эвтектики CrSi₂–Si состава 29,0 мас.% Cr и 71,0 мас.% Si содержится 6,4 мас.% Cr и 15,5 мас.% Si.

Таким образом, установлено, что высококремнистая эвтектика в тройной системе Ni–Cr–Si плавится при температуре $T_{\text{эвт}} = 870 \text{ °C}$ и содержит 53,0 мас.% (36,4 ат.%) Ni, 6,4 мас.% (5,0 ат.%) Cr и 40,6 мас.% (58,6 ат.%) Si.

Результаты анализа расположения координат сплавов PC относительно двойных и тройных точек эвтектик представлены на диаграмме состояния системы Ni–Cr–Si (рис. 3). Точки тройных эвтектик E_5 и E_6 в системе Ni–Cr–Si расположены вблизи горизонтальной линии, соединяющей эвтектики NiSi–NiSi₂ и CrSi–CrSi₂ (e_2 – e_4). Поскольку эвтектики содержат только 10,2 и 5,0 ат.% Cr, то и находятся вблизи точки e_2 эвтектики NiSi–NiSi₂.

Координаты резистивных сплавов серии PC расположены параллельно линии, соединяющей двойные эвтектики e_3 и e_4 , и находятся на достаточно большом расстоянии от тройных эвтектик E_5 и E_6 , что повышает вероятность образования микротрещин при изготовлении из таких сплавов мишеней методом литья.

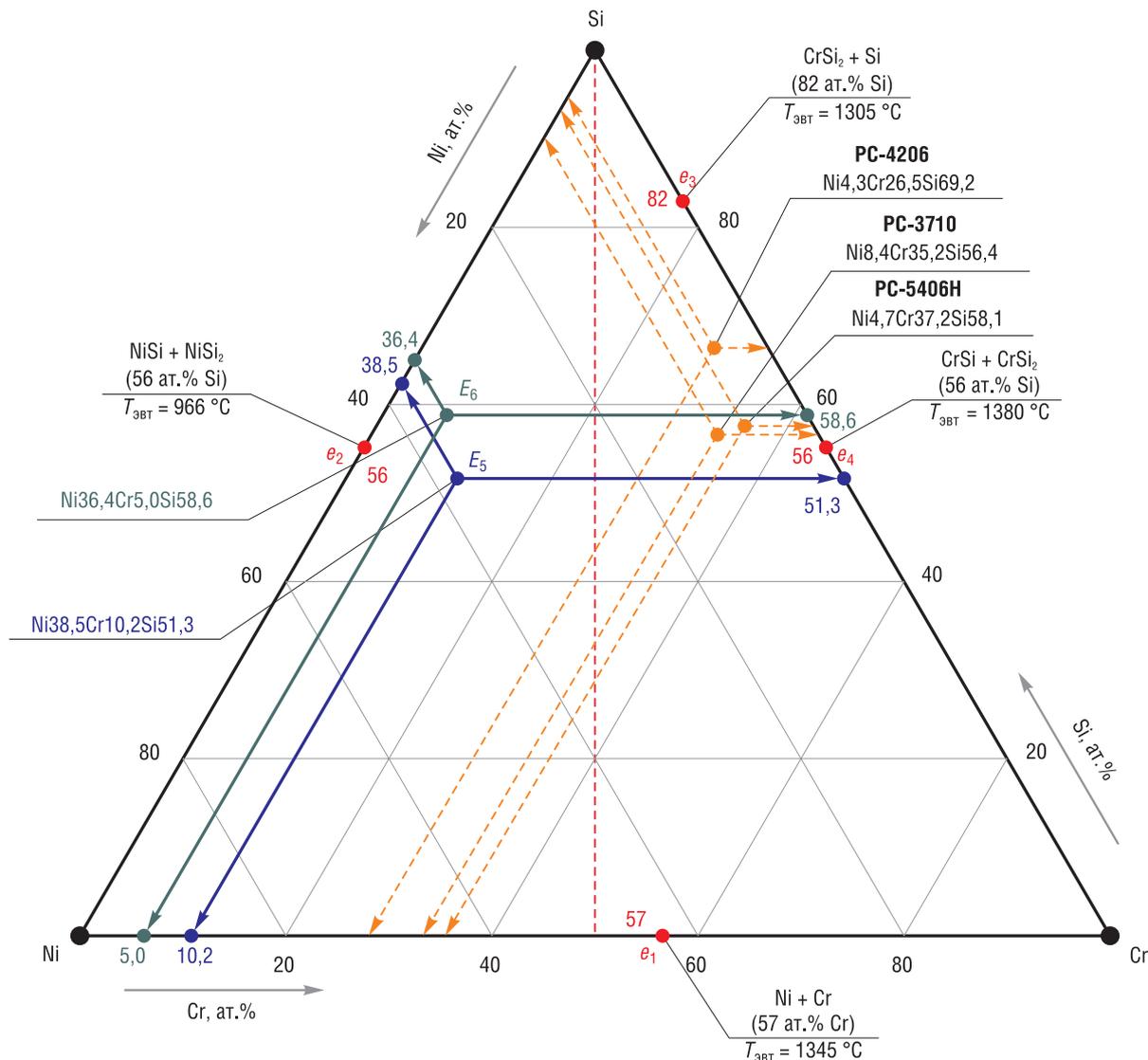


Рис. 3. Расположение резистивных сплавов относительно двойных и тройных эвтектик в системе Cr–Ni–Si.
 $E_5 = \text{Ni}_{38,5}\text{Cr}_{10,2}\text{Si}_{51,3}$; $E_6 = \text{Ni}_{36,4}\text{Cr}_{5,0}\text{Si}_{58,6}$ (ат.%)

Fig. 3. The location of resistive alloys relative to double and ternary eutectics in the Cr–Ni–Si system.
 $E_5 = \text{Ni}_{38,5}\text{Cr}_{10,2}\text{Si}_{51,3}$; $E_6 = \text{Ni}_{36,4}\text{Cr}_{5,0}\text{Si}_{58,6}$ (at.%)

Экспериментальная проверка расчетов и их обсуждение. В качестве исходных материалов для выплавки мишеней мы использовали поликристаллический кремний марки Кр00 (ГОСТ 2169), хром электролитический рафинированный марки ЭРХ-1, никель марки Н-1 (ГОСТ 849). Для выплавки сплавов применяли высокочастотную индукционную печь марки ИСТ-0.06. Плавку осуществляли в графито-шамотных тиглях в атмосфере аргона.

Было исследовано влияние режимов отжига на УПС и ТКС резистивных пленок толщиной 80 и 100 нм, полученных магнетронным распылением мишени из наиболее широко применяемого сплава РС-3710 (напряжение постоянного тока $U = 500\text{--}600$ В, давление аргона $1,5 \cdot 10^{-1}$ Па).

В качестве подложек использовали кремниевые пластины с выращенным на них подслоем высокотемпературного диоксида кремния SiO_2 толщиной 0,4 мкм. Термообработку проводили в диапазоне температур от 300 до 900 К в течение 30 мин в среде азота.

Установлено, что при температуре отжига $T_0 = 570$ °С в течение 30 мин в атмосфере азота УПС пленки сплава РС-3710 толщиной 100 нм проходит через минимум и составляет 150–200 Ом/кв. При $T_0 > 770$ К УПС пленок стабилизируется и составляет 300–330 Ом/кв.

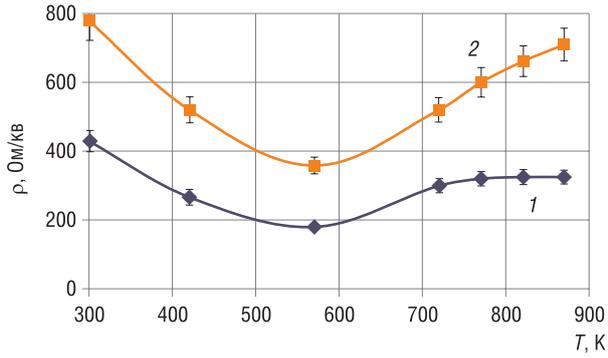


Рис. 4. Влияние температуры отжига пленок сплава РС-3710 в атмосфере азота на их удельное поверхностное сопротивление ρ . Толщина пленки: 1 – 100 нм, 2 – 80 нм; время отжига 30 мин

Fig. 4. Influence of the annealing temperature of PC-3710 alloy films in a nitrogen atmosphere on their sheet resistivity. Film thickness: 1 – 100 nm, 2 – 80 nm; annealing 30 min

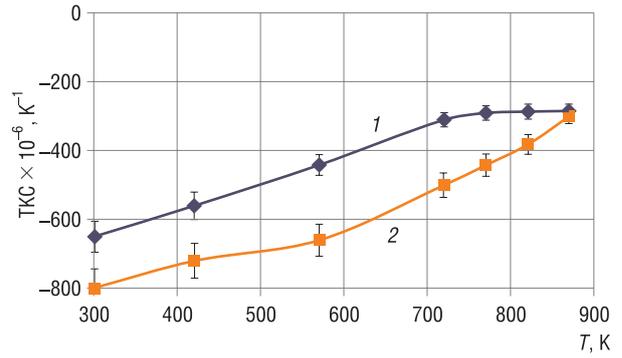


Рис. 5. Влияние температуры отжига на ТКР пленок сплава РС-3710. Толщина пленки: 1 – 100 нм, 2 – 80 нм; время отжига 30 мин

Fig. 5. Influence of the annealing temperature on TCR of PC-3710 alloy films. Film thickness: 1 – 100 nm, 2 – 80 nm; annealing 30 min

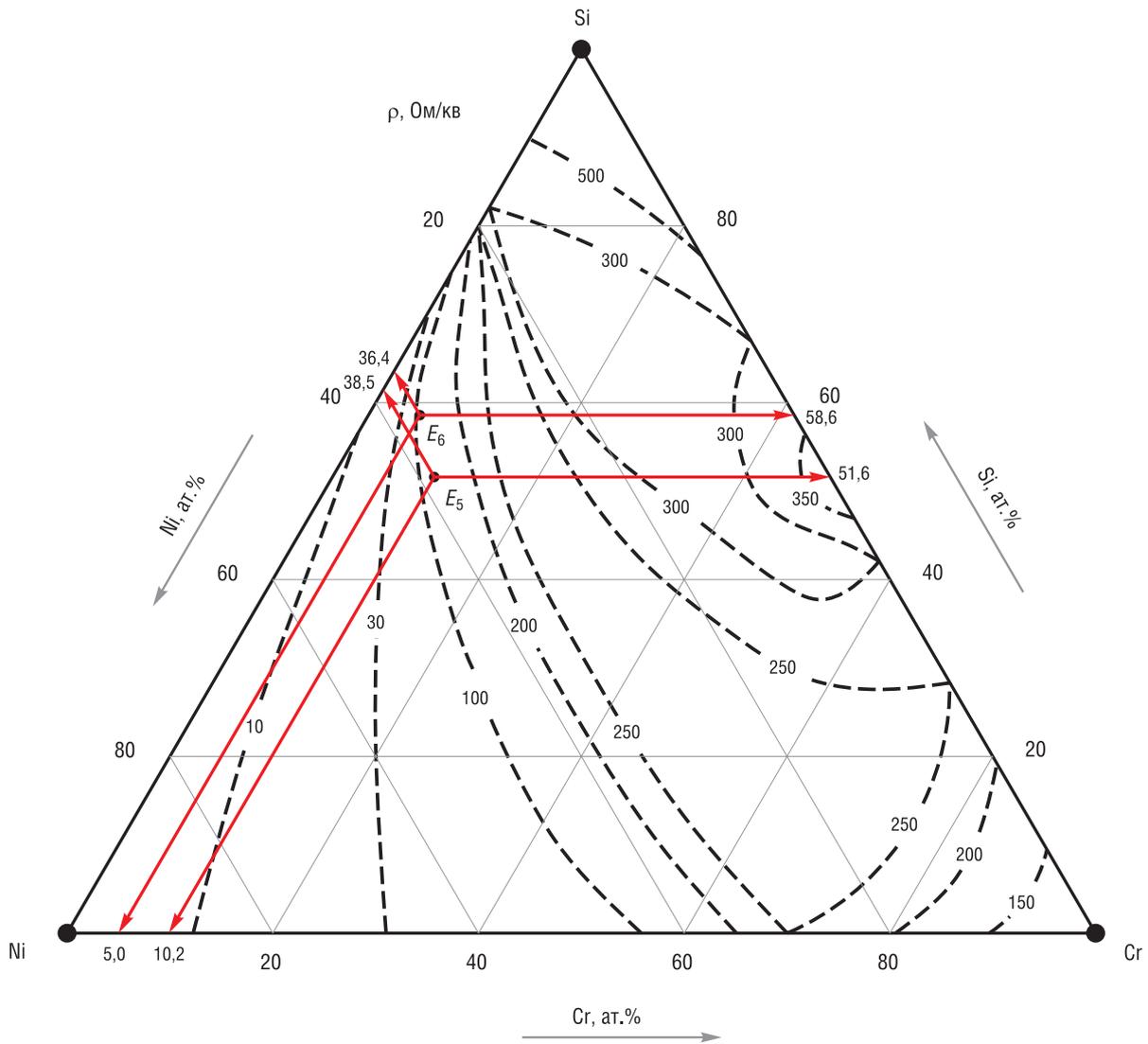


Рис. 6. Диаграмма состав–УПС пленок системы Cr–Ni–Si толщиной 100 нм, нанесенных на подложки Si–SiO₂ методом магнетронного распыления и отожженных при $T_0 = 700$ К в течение 30 мин

Fig. 6. Composition–sheet resistivity diagram of 100 nm films of the Cr–Ni–Si system deposited on Si–SiO₂ substrates by magnetron sputtering and annealed at $T_0 = 700$ K for 30 min

УПС пленок толщиной 80 нм также проходит через минимум при $T_0 = 570$ К и составляет 350–400 Ом/кв. При $T_0 > 570$ К УПС пленок толщиной 80 нм непрерывно возрастает и достигает 700 Ом/кв (рис. 4).

Сплавы на основе CrSi_2 (РС-3710, РС-4206, РС-4800) могут обеспечить формирование тонкопленочных резисторов с удельным поверхностным сопротивлением до 600 Ом/кв. Данные о наличии материалов, обеспечивающих получение пленок с $\rho \sim 1$ кОм/кв и выше при ТКС лучше $\pm (50-100) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, ограничены.

Измерение УПС резистивных пленок проводили с помощью цифрового измерителя удельного сопротивления (ЦИУС-1) при температурах 300 и 400 К при смещении 0,3 В. Результаты измерений ТКС пленок представлены на рис. 5.

В ходе эксперимента установлено, что ТКС пленок толщиной 80 нм при повышении температуры отжига непрерывно смещается в сторону положительных значений от исходного значения $-800 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у неотожженных пленок до $-300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у пленок, отожженных при 600 °С. ТКС пленок толщиной 100 нм при повышении температуры отжига также смещается в сторону положительных значений от исходного значения $-650 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у неотожженных пленок до $-300 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ у пленок, отожженных при 500 °С. При дальнейшем повышении температуры отжига пленок сплава РС-3710 толщиной 100 нм величина их ТКС стабилизируется и составляет $-(280-320) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (см. рис. 5).

На основании обобщения экспериментальных данных нами построена диаграмма состав–УПС пленок системы Cr-Ni-Si толщиной 100 нм, нанесенных методом магнетронного распыления и отожженных при $T_0 = 700$ К в течение 30 мин (рис. 6).

Заключение. В ходе проведенных исследований установлено, что резистивные пленки системы Cr-Ni-Si , нанесенные методом магнетронного распыления на кремниевые полупроводниковые пластины с подслоем SiO_2 , при толщине 100 нм имеют УПС до 350 Ом/кв. Показано, что для изготовления мишеней МРС методом литья необходимо снизить температуру плавления и хрупкость сплавов, то есть определить их эвтектические составы.

Проведены расчеты и установлено, что эвтектики в системе Cr-Ni-Si содержат 36,4 и 38,5 ат.% Ni, что в 4–6 раз выше, чем у сплавов серии РС этой системы. В связи с большим содержанием Ni УПС пленок эвтектических составов толщиной 100 нм находится в диапазоне от 100 до 200 Ом/кв.

Для повышения УПС резистивных пленок и снижения температуры плавления сплавов целесообразна разработка новых четырех-пятикомпонентных сплавов на основе системы Cr-Ni-Si с введением в нее тугоплавких (Mo, Nb) и редкоземельных (La, Y) элементов.

Список использованных источников

1. Технология тонких пленок / под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; пер. с англ. под ред. М. И. Елинсона, Г. Г. Смолко. – М.: Совет. радио, 1977. – Т. 2. – 768 с.
2. Готра, З. Ю. Резистивные материалы для низкоомных тонкопленочных резисторов интегральных схем / З. Ю. Готра, А. Н. Войтеков, И. Я. Хромяк // Электронная техника. Сер. 3, Микроэлектроника. – 1984. – № 2. – С. 47–80.
3. Структура, топология и свойства пленочных резисторов / Л. И. Гурский [и др.]; под ред. В. А. Лабунова. – Минск: Наука и техника, 1987. – 264 с.
4. Крукович, М. Г. Расчет эвтектических концентраций и температуры в двух- и многокомпонентных системах / М. Г. Крукович // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2005. – № 10. – С. 9–17.

References

1. Maissel L., Glang R. (eds.). *Handbook of Thin Film Technology*. New York, Mc-Grow Hill, 1970. 800 p.
2. Gotra Z. Yu, Vojtekov A. N., Hromyak I. Ya. Resistive materials for low-resistance thin-film resistors of integrated circuits. *Elektronnaya tekhnika. Seriya 3, Mikroelektronika* [Electronic Equipment. Series 3, Microelectronics], 1984, no. 2, pp. 47–80 (in Russian).
3. Gurskii L. I., Zelenin V. A., Zhebin A. P., Vahrin G. L., Labunov V. A. *Structure, Topology and Properties of Film Resistors*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1987. 264 p. (in Russian).
4. Krukovich M. G. Computation of Eutectic Concentrations and Temperature in Two-Component and Multicomponent Systems. *Metal Science and Heat Treatment*, 2005, vol. 47, no. 9–10, pp. 447–454. <https://doi.org/10.1007/s11041-006-0009-y>

Информация об авторах

Волочко Александр Тихонович – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volochkoat@mail.ru

Зеленин Виктор Алексеевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vazelenin@mail.ru

Мельник Наталья Юрьевна – научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bukato_n@tut.by

Information about the authors

Alexander T. Volochko – D. Sc. (Engineering), Professor, Department Head, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volochkoat@mail.ru

Victor A. Zelenin – D. Sc. (Engineering), Chief Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vazelenin@mail.ru

Natalia Yu. Melnik – Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bukato_n@tut.by

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.762.8

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53>

Поступила в редакцию 05.02.2020

Received 05.02.2020

Л. Н. Дьячкова*Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь*

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ С ДОБАВКАМИ, АКТИВИРУЮЩИМИ ДИФФУЗИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СПЕКАНИИ

Аннотация. Исследовано влияние активирования процесса спекания порошковой стали, легированной никелем или хромом, за счет диспергирования исходных порошков и введения соединений щелочного металла. Изучена кинетика размола исходных порошков железа, X30 и смеси порошков железа с 4 % никеля. Показано, что в зависимости от твердости порошка его измельчение происходит в три или две стадии. При размоле более твердых порошков отсутствует стадия интенсивной деформации частиц и увеличения их размера. Дефекты кристаллической решетки, образующиеся при размоле порошков, ускоряют диффузионные процессы, что способствует при температуре спекания на 100–200 °С ниже по сравнению с температурой спекания сталей из исходных порошков образованию однородной структуры, снижению на 4–17 % пористости, а также повышению прочности порошковых сталей в 1,5–1,6 раза. Установлен механизм воздействия бикарбоната натрия на ускорение диффузии углерода, никеля и хрома в железо. При введении бикарбоната натрия под действием паров воды, образующихся при его разложении до карбоната, формируются тонкие оксидные пленки на железных частицах, активно восстанавливающиеся в защитно-восстановительной атмосфере при спекании. Это приводит к образованию металлического контакта между частицами, ускорению самодиффузии атомов железа и диффузии легирующих добавок в железо в 5–7 раз в зависимости от температуры спекания и количества вводимой добавки. Натрий образует по границам зерен железной основы нанодисперсные сложные соединения ферритного типа $\text{Na}_3\text{Fe}_5\text{O}_9$, которые обеспечивают измельчение зерен и образование однородной структуры. Изменения в структуре порошковой стали при введении бикарбоната натрия обуславливают повышение ее прочности в 1,5–1,7 раза. Полученные результаты могут быть использованы при получении конструктивных изделий из легированных порошковых сталей.

Ключевые слова: порошковая сталь, активирующие добавки, спекание, диффузия, свойства

Для цитирования: Дьячкова, Л. Н. Особенности формирования структуры и свойств порошковых сталей с добавками, активирующими диффузионные процессы при спекании / Л. Н. Дьячкова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 43–53. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53>

Larisa N. Dyachkova*O. V. Roman Powder Metallurgy Institute, Minsk, Republic of Belarus*

FEATURES OF THE FORMATION OF THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF POWDER STEELS WITH ADDITIVES THAT ACTIVATE DIFFUSION PROCESSES DURING SINTERING

Abstract. Effect of activating the sintering process of powder steel alloyed with nickel or chromium by grinding the initial powders and introducing alkali metal compounds was investigated. The kinetics of grinding the initial iron powders, Cr30, and a mixture of iron powders with 4 % nickel was studied. It is shown that, depending on the hardness of the powder, it is grinded in three or two stages. When grinding more hard powders, there is no stage of intensive deformation of particles and an increase in their size. Crystalline lattice defects resulting from grinding of powders accelerate diffusion processes. This reduces sintering temperature by 100–200 °C compared to the sintering temperature of steels from the initial powders, contributes to a homogeneous structure, reduces porosity by 4–17 %, and increase strength of powder steels by 1.5–1.6 times. The mechanism of the effect of sodium bicarbonate on the acceleration of diffusion of carbon, nickel and chromium into iron has been established. With the introduction of sodium bicarbonate under the action of water vapor, formed upon its decomposition to carbonate, thin oxide films are formed on iron particles, which are actively recovered in a protective-recovering atmosphere during sintering. This leads to formation of a metal contact between the particles, acceleration of the self-diffusion of iron atoms and the diffusion of alloying additives into iron by 5–7 times, depending on the sintering temperature and the amount of added additive. Sodium forms nanodispersed complex compounds of the ferritic type $\text{Na}_3\text{Fe}_5\text{O}_9$ along the grain boundaries of the iron base, which provide grain refinement and the formation of a homogeneous structure. Changes in the structure of powder steel with the introduction of sodium bicarbonate cause an increase in its strength by 1.5–1.7 times. The results can be used to obtain structural products from alloyed powder steels.

Keywords: powder steel, activation additives, sintering, diffusion, properties

For citation: Dyachkova L.N. Features of the formation of the structure and properties of powder steels with additives that activate diffusion processes during sintering. *Vestsi Natsyynal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 43–53 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-43-53>

Введение. Порошковая металлургия является одним из наиболее прогрессивных процессов получения изделий различного назначения. Многочисленные технологические процессы порошковой металлургии позволяют сократить расход материалов и энергозатраты, а также автоматизировать производство. Обеспечение необходимого сочетания технологичности и надежности изделий, а также требуемых свойств осуществляется путем управления процессами формирования структуры порошковых сталей. Их свойства зависят от степени однородности структуры, формирующейся при спекании, то есть протекания диффузионных процессов, которые определяются структурным состоянием и дисперсностью частиц железа и легирующих добавок, соотношением взаимодействующих компонентов, степенью окисленности исходных порошков, режимами спекания, характером атмосферы [1–3]. Изменяя указанные факторы, можно получать разнообразное сочетание структурных составляющих.

Углерод и легирующие элементы вводятся в железную основу порошковых сталей при смешивании порошков. В качестве углерода используются графит различной структуры, технический углерод и наноглеродные порошки. Наиболее распространенными добавками углерода являются порошки природного графита различных модификаций (карандашный, литейный, электроуглеродный и др.) и синтетического графита [4]. Они отличаются уровнем чистоты, кристаллографической структурой (размером и ориентацией кристаллитов) и морфологией частиц. Большую роль в процессах структурообразования порошковых углеродистых сталей играет активность углеродсодержащей добавки. Скорость и степень растворения графита возрастают с повышением его активности. Активность углеродной добавки оказывает существенное влияние на восстановление оксидов, присутствующих на поверхности порошков железа и легирующих элементов. Синтетический графит обладает наиболее высокой реакционной способностью при спекании и обеспечивает более высокие механические свойства порошковой стали [2–4].

В [5–7] исследовано влияние степени графитизации углеродной добавки на процесс спекания порошковой углеродистой стали. Показано, что наиболее перспективно применение малозольного графита, пироуглерода, высокотемпературного каменноугольного пека. При использовании искусственного графита и высокотемпературного пека основным процессом спекания является поверхностная диффузия, пироуглерода и природного графита – объемная диффузия и вязкое течение.

Для улучшения свойств порошковых сталей в качестве углеродсодержащей добавки вводятся нанопорошки углерода [8] и легирующие элементы [9]. Однако в этом случае, несмотря на высокую активность нанопорошков, невозможно получить однородную структуру во время спекания из-за неравномерного распределения углерода в порошковой смеси.

Активирование диффузионных процессов при спекании порошковых углеродистых сталей возможно также за счет введения либо углерода в виде активной углеродсодержащей добавки [10], либо добавок, вызывающих окислительно-восстановительные реакции, в результате которых образуется атомарный углерод, активно диффундирующий в железную основу.

В качестве легирующих добавок в порошковых сталях применяются те же элементы, что и в компактных сталях, но наиболее используемыми являются медь, никель, хром, молибден [11].

В порошковой стали, легированной хромом или молибденом, оксид состоит из оксида железа и более стабильного оксида хрома или молибдена. Для эффективного восстановления таких оксидов в [12] использовались графит и атмосфера различного состава. Установлено, что при использовании сочетания сухой водородсодержащей атмосферы и тонкого графита происходит восстановление оксидов.

Для получения однородной структуры в легированных порошковых сталях разработаны методы механической активации исходных порошков, а также введения различных активирующих добавок [13–20].

Активное состояние частиц порошка, характеризующееся избыточным запасом свободной энергии, может быть получено за счет повышения удельной поверхности, дефектности кристаллического строения, наличия макро- и микродефектов [15–17]. Существенного искажения кристаллической решетки, а значит повышенной активности порошков можно достичь их механической активацией в размольных аппаратах. При этом изменяется энергия кристаллической решетки порошков вследствие образования дефектов структуры (дислокаций, вакансий), растворов внедрения, новых поверхностей раздела [16]. Наведенные при механоактивации в материалах дефекты создают благоприятные условия для само- и гетеродиффузии внутри активированных частиц, что, в свою очередь, сказывается на существенном уменьшении температуры структурных превращений в материалах [16, 17].

Целью настоящей работы является исследование особенностей формирования структуры и свойств порошковых сталей при активации процесса спекания за счет механоактивации порошков и введения активирующих добавок различной природы.

Методика исследований. В качестве легирующих добавок использовали хром и никель. Хром вводили в виде порошка ПХ30 (ГОСТ 13084-88), никель – порошка ПНК (ГОСТ 9722-97). Для основы применяли железный порошок марки ПЖР (ГОСТ 9849-86) со средним размером частиц 160 мкм. Порошки смешивали в смесителе типа «пьяная бочка» в течение 3 ч.

Механоактивацию порошков проводили в вибромельнице в среде этилового спирта. Изучали кинетику измельчения порошков железа, ПХ30 и смеси железа с никелем. Время размолла составляло 5–50 ч. Средний размер частиц определяли через каждые 5 ч с помощью металлографического анализа.

Для активации диффузии легирующих элементов вводили соединения щелочных металлов (бикарбонаты натрия, калия, лития).

Чтобы исследовать влияние щелочных металлов на диффузию легирующих элементов в железо применяли метод радиоактивного и микрорентгеноспектрального анализов. Радиоактивный метод основан на определении концентрации изотопов на разных глубинах диффузионной зоны. Удельную радиоактивность снятого слоя устанавливали по разности интегральной интенсивности излучения образца до и после снятия слоя с помощью измерения интегральной радиоактивности торцевым счетчиком Т25-БФЛ на радиометре марки ДП-100. Ошибка измерения не превышала 1,5 %.

Распределение атомов диффундирующих элементов в диффузионных слоях исследовали с помощью микрорентгеноспектрального анализа методом продольного среза на двуслойных образцах, полученных прессованием последовательно засыпаемых в пресс-форму порошков железа и никеля и последующим спеканием при температурах 950, 1100, 1250 °С в течение 4 ч в атмосфере диссоциированного аммиака.

Распределение элементов в диффузионной зоне определяли построением кривых изменения интенсивности спектральных линий на анализаторе Cameca MS-46. Расшифровку концентрационных кривых проводили по методу Матано [22].

Структуру образцов исследовали на микроскопе MEF-3. Параметры решетки определяли с помощью рентгеноструктурного анализа на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3, прочность при растяжении на образцах – на испытательной машине Instron при скорости нагружения 2 мм/мин.

Результаты исследований. *Диспергирование порошков.* Исследование кинетики измельчения порошков показало, что кривые измельчения, независимо от состава порошков, носят затухающий характер (рис. 1). С увеличением времени размолла средний размер частиц уменьшается до определенной величины, после чего измельчение практически прекращается.

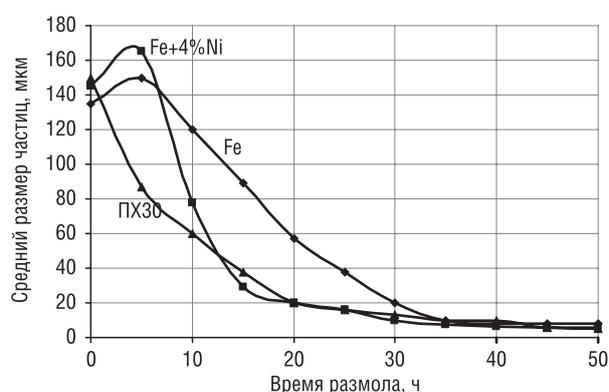


Рис. 1. Кинетические кривые измельчения порошков
Fig. 1. Kinetic powder grinding curves

Кинетика размола смеси порошков железа и 4 % никеля имеет такой же характер, как и железного порошка, однако измельчение происходит более интенсивно. Конечный размер частиц смеси порошков меньше, чем частиц железного порошка, и составляет 6–8 мкм. Объясняется это тем, что в процессе размола смеси порошков наряду с процессами, характерными для размола порошка одного материала, происходит механическое легирование железного порошка и образование твердого раствора, который имеет большую твердость. Наличие процесса механического легирования подтверждается рентгеноструктурным анализом: наблюдается сдвиг линии железа с образованием дублета K_{α_1} – K_{α_2} на больших углах отражения, что связано с формированием твердого раствора никеля в железе. Однако механическое легирование происходит не во всех частицах железного порошка. Полуколичественная оценка показала, что соотношение между легированным и нелегированным порошком составляет 70 : 30.

Частицы более твердого порошка ПХ30 после размола еще мельче – 5–6 мкм. Кроме того, у размолотого порошка ПХ30 ниже склонность к агломерации.

Процесс размола условно делится на три периода. В первом периоде, продолжительность которого составляет, как правило, 5 ч, наблюдаются увеличение среднего диаметра частиц вследствие деформации пластичных частиц железа и никеля и их расплющивание (рис. 2, *a*). При размоле порошка ПХ30, частицы которого, как уже было сказано, значительно тверже частиц железа, первая стадия измельчения практически отсутствует (рис. 1 и 2, *c*). Процесс разрушения превалирует над процессом наклепа, поэтому увеличения размера частиц не происходит, а наблюдается интенсивное измельчение. На второй стадии размола наклепанные частицы, достигшие предельно упрочненного состояния, охрупчиваются и начинают разрушаться, на этой стадии происходит наиболее интенсивное измельчение частиц. Образуются частицы осколочной формы с поверхностями, имеющими явно выраженные признаки хрупких сколов – фасетки (рис. 2, *b*, *c*). Это происходит в случае, когда скорость приложения нагрузки в циклах нагрузка – разгрузка больше скорости релаксации напряжений, а скорость увеличения поверхностной энергии при возрастании удельной поверхности больше или равна скорости уменьшения упругой энергии кристалличе-

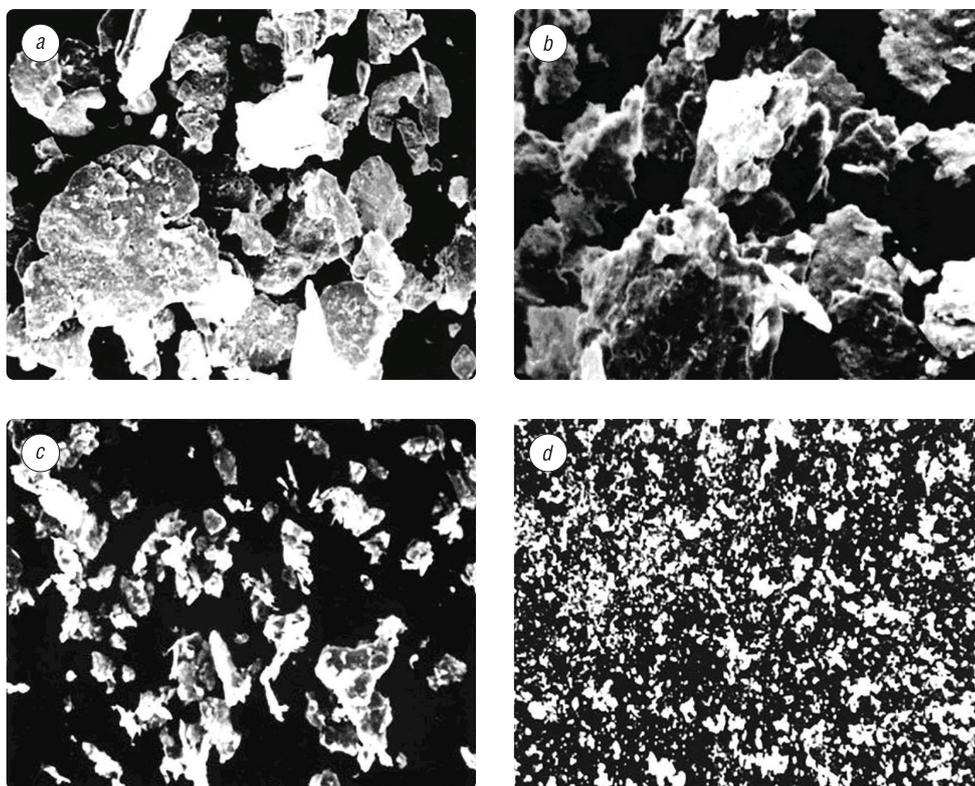


Рис. 2. Изменение формы частиц порошка железа в процессе размола: *a* – через 5 ч, *b* – через 10 ч, *c* – через 15 ч, *d* – через 30 ч

Fig. 2. Change in the shape of iron powder particles during grinding: *a* – after 5 h, *b* – after 10 h, *c* – after 15 h, *d* – after 30 h

ской решетки порошка. В третьем, конечном периоде размола скорость размола падает, достигнув определенной величины, средний размер частиц практически не изменяется, устанавливается равновесие. Скорость приложения нагрузки в цикле нагрузка – разгрузка становится равной или меньше скорости релаксации упругой энергии кристаллической решетки частиц. Частицы достаточно упрочнены, имеют на поверхности более прочную и твердую оболочку, в результате порошки не дробятся, а как бы обкатываются, приобретая округлую форму (рис. 2, *d*).

Исследование тонкой структуры показало, что на первой стадии измельчения частиц возрастают микроискажения, на рентгенограммах наблюдаются размытие интерференционных линий и увеличение физического уширения; на второй стадии уширение линий на рентгенограмме и величина микроискажений уменьшаются; на третьей стадии вновь наблюдается уширение рентгеновских линий, связанное с увеличением микроискажений (рис. 3).

Отчетливой границы между описанными стадиями размола нет, имеет место лишь преимущественное протекание процессов, характерных для той или иной стадии размола.

Дефекты кристаллической решетки, образующиеся при размоле порошков, влияют на скорость диффузионных процессов. В соответствии с вакансионной теорией диффузии [23], коэффициент диффузии пропорционален концентрации вакансий. Дислокации не влияют на диффузию непосредственно, и хотя имеются данные об ускорении диффузии вдоль центров дислокаций, более важным представляется образование вакансий в процессе пластической деформации.

Исследования структуры и свойств сталей, полученных из исходных и диспергированных порошков железа, железа с 3 % ПХ30 и железа с 4 % никеля, показали, что, благодаря ускорению диффузионных процессов в предварительно диспергированных порошках, практически однородная структура в сталях достигается при более низких температурах спекания. Кроме того, механическое диспергирование порошков снижает склонность материала к росту зерна при спекании. Температура гомогенизации материалов из диспергированных порошков на 100–200 °С ниже температуры гомогенизации материалов из исходных порошков. Это, в свою очередь, обеспечивает более высокую прочность материалов из диспергированных порошков.

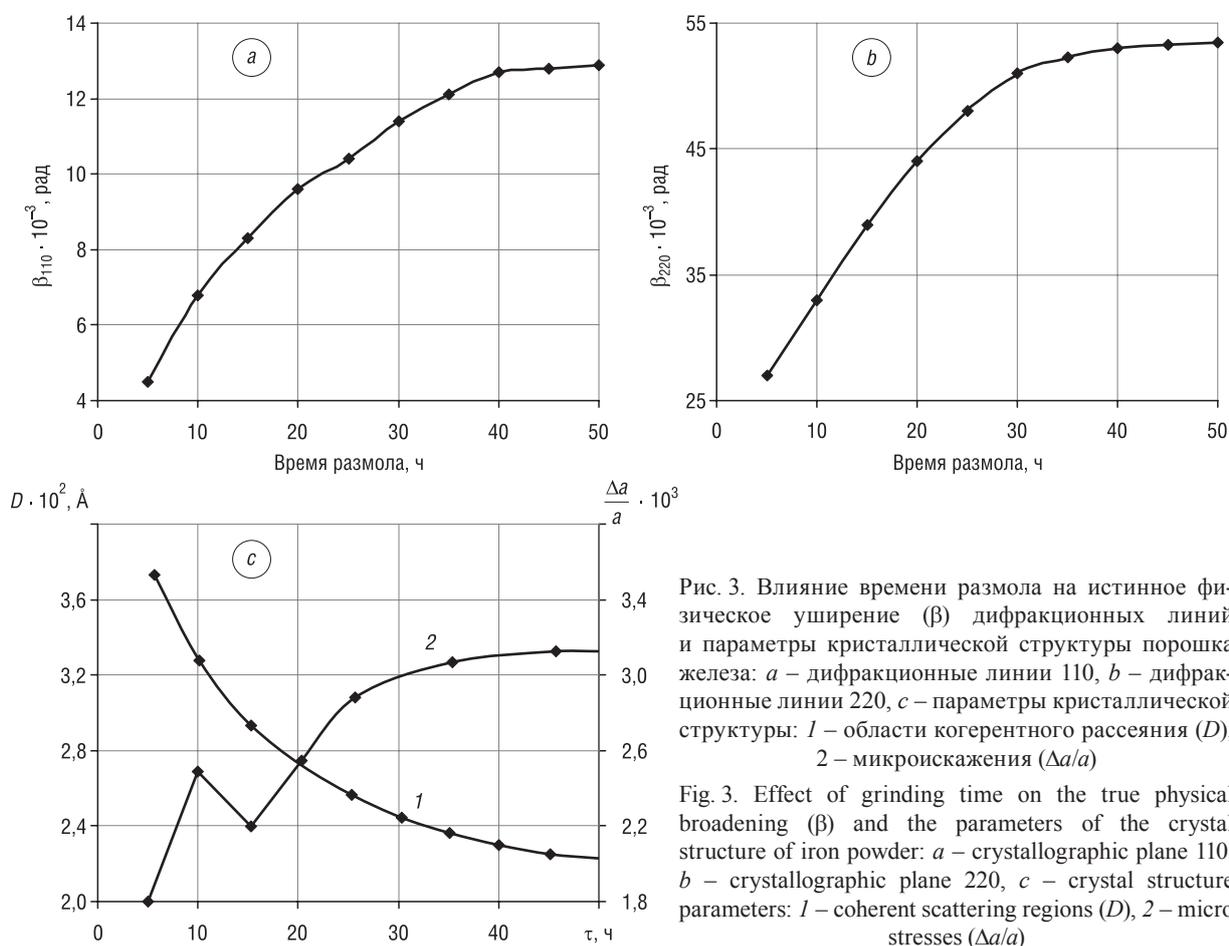


Рис. 3. Влияние времени размола на истинное физическое уширение (β) дифракционных линий и параметры кристаллической структуры порошка железа: *a* – дифракционные линии 110, *b* – дифракционные линии 220, *c* – параметры кристаллической структуры: 1 – области когерентного рассеяния (D); 2 – микроискажения ($\Delta a/a$)

Fig. 3. Effect of grinding time on the true physical broadening (β) and the parameters of the crystal structure of iron powder: *a* – crystallographic plane 110, *b* – crystallographic plane 220, *c* – crystal structure parameters: 1 – coherent scattering regions (D), 2 – micro stresses ($\Delta a/a$)

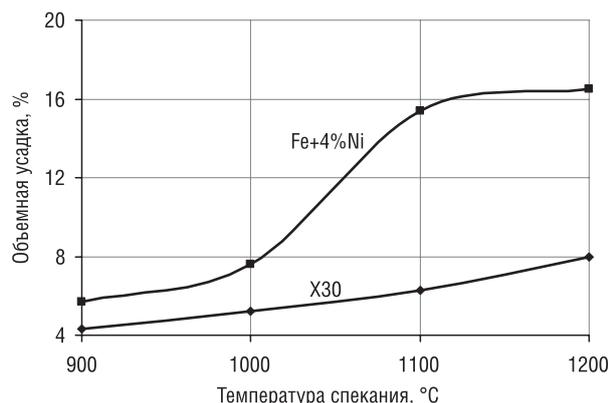


Рис. 4. Зависимость объемной усадки сталей из диспергированных порошков, легированных хромом и никелем, от температуры спекания

Fig. 4. Dependence of the volumetric shrinkage of powder steels, alloyed with chromium and nickel, on the sintering temperature

Таким образом, предварительное диспергирование порошков является весьма перспективным для активирования спекания порошковых легированных сталей. Однако в процессе спекания изделий из диспергированного порошка происходит их интенсивная усадка, что затрудняет получение точных размеров изделий.

Введение щелочных металлов. Щелочные металлы, располагаясь в ряду напряжений левее большинства легирующих элементов, вводимых в сталь, способны восстанавливать их из соединений, устраняя барьерную роль оксидов. Будучи мало растворимыми в α - и γ -железе и поверхностно активными относительно него, большинство из них сегрегирует преимущественно по границам зерен. Поверхностная энергия границ при этом понижается, повышается энергия активации роста зерна [21], что приводит к измельчению структуры при рекристаллизации. Кроме того, адсорбируясь по границам зерен, щелочные металлы способствуют оттеснению атомов горючих элементов (Cr, Ni, C) в тело зерна, тем самым, способствуя образованию гомогенной структуры. Кроме того, при введении соединений щелочных металлов, благодаря образованию жидкой фазы вследствие их низкой температуры плавления, ускоряются диффузионные процессы и объемные изменения при спекании.

Согласно [25], при нагреве бикарбоната натрия при температуре 160–180 °C протекает эндотермическая реакция, связанная с превращением бикарбоната в карбонат с выделением CO_2 и H_2O . Повышение температуры до 850–860 °C вызывает плавление карбоната натрия, температура плавления которого составляет 851 °C, и как следствие образование жидкой фазы.

При температуре спекания выше 850 °C в порошковых сталях с добавкой соединений щелочных металлов происходят объемные изменения: так, усадка в 2 раза больше, чем без добавки. Появление жидкой фазы способствует также ускорению диффузионных процессов и приводит к сфероидизации пор.

Эффективный коэффициент диффузии никеля в железо при введении бикарбоната натрия в порошковую сталь больше (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Эффективный коэффициент диффузии никеля в порошковое железо

T a b l e 1. Effective coefficient of diffusion of nickel into iron powder

Материал	Эффективный коэффициент диффузии никеля при различных температурах, $\times 10^{-15}$, m^2/s			
	950 °C	1150 °C	1200 °C	1250 °C
Fe	6,0	15,0	17,0	31,0
Fe + 0,5 % NaHCO_3	19,0	22,4	45,7	56,0

Так, сталь с 3 % ПХ30 из исходных порошков, спеченная при температуре 1200 °C в течение 3 ч, имеет предел прочности при растяжении 280 МПа, из диспергированных – 460 МПа; с 4 % никеля – 320 и 530 МПа соответственно. Увеличение прочности объясняется не только более однородной и мелкозернистой структурой, но и большей плотностью стали, так как скорость уплотнения образцов при спекании обратно пропорциональна размеру частиц исходного порошка не менее чем в первой степени [24].

Исследования показали, что при спекании все образцы из диспергированных порошков испытывали объемную усадку в пределах 4–17 % в зависимости от состава материала и температуры спекания (рис. 4). Прочность сталей при этом повышается в 1,5–1,6 раза.

Температурная зависимость коэффициента диффузии никеля в спеченном железе и железе с добавкой 0,5 % бикарбоната натрия описывается следующими уравнениями:

$$D = 6,7 \cdot 10^{-4} \exp \left[-\frac{183500 \pm 8000}{RT} \right], \quad (4)$$

$$D = 1,3 \cdot 10^{-5} \exp \left[-\frac{127500 \pm 700}{RT} \right]. \quad (5)$$

При изучении диффузионной активности никеля в железе с помощью микрорентгеноспектрального анализа в железо добавляли 0,2 и 1,0 % бикарбоната натрия или 0,2 и 1,0 % графита. Графит вводили с целью исключения положительного влияния углерода, содержащегося в бикарбонате натрия, на диффузию никеля в железо.

Исследование микроструктуры двуслойных железо-никелевых образцов, спеченных при различной температуре, показало, что введение бикарбоната натрия приводит к расширению диффузионной зоны (рис. 5). Добавка бикарбоната натрия увеличивает ширину диффузионной зоны двуслойного материала Fe–Ni, спеченного при 950 °С, с 25 до 52 мкм. Бикарбонат натрия повышает диффузионную подвижность никеля в железе в 2,5–3 раза при низких температурах, с повышением температуры влияние несколько ослабевает. После спекания при 1250 °С ширина диффузионной зоны составляет 76 мкм для исходного железа и 148 мкм для железа с добавкой 1,0 % бикарбоната натрия.

По кривым изменения интенсивности спектральных линий железа и никеля рассчитывали коэффициент взаимной диффузии, который имеет иную физическую сущность по сравнению с эффективным коэффициентом диффузии. Это обусловило разницу в их абсолютных значениях (табл. 2). Введение графита также способствует повышению коэффициента взаимной диффузии никеля и железа благодаря восстановлению оксидов и образованию ювенильных поверхностей, однако его действие менее эффективно, чем бикарбоната натрия. Интенсификация диффузии при введении бикарбоната натрия происходит за счет не только восстановления оксидов легирующих элементов, но и снижения энергии границ зерен вследствие их рафинирования.

Как видно из табл. 2, коэффициент диффузии никеля в железо при введении бикарбоната натрия увеличивается в 5–7 раз в зависимости от температуры спекания и количества вводимой добавки.

Таблица 2. Значения коэффициента взаимной диффузии никеля и железа в образцах, спеченных при различной температуре

Table 2. Values of the coefficient of mutual diffusion of nickel and iron in samples sintered at different temperatures

Концентрация никеля в образце, %	Температура спекания, °С	Коэффициент взаимной диффузии никеля и железа, $\times 10^{-16}$ м ² /с, в образцах			
		Fe	Fe + 0,2 % NaHCO ₃	Fe + 0,2 % C	Fe + 1 % NaHCO ₃
1	950	2,65	9,96	6,42	12,86
	1100	3,39	14,22	10,15	17,84
	1250	21,83	23,81	100,8	111,6
5	950	4,0	10,9	6,89	13,4
	1100	6,16	24,31	11,73	27,94
	1250	64,55	68,88	177,1	195,4
10	950	9,48	16,1	9,78	22,3
	1100	12,9	29,9	12,9	39,8
	1250	71,0	71,4	222,9	256,7
20	950	13,4	23,4	14,7	29,9
	1100	18,1	38,6	27,0	62,3
	1250	73,1	85,7	297,3	489,1
50	950	18,6	23,6	68,9	148,7
	1100	38,3	43,5	191,1	276,2
	1250	108,9	119,6	352,2	684,5

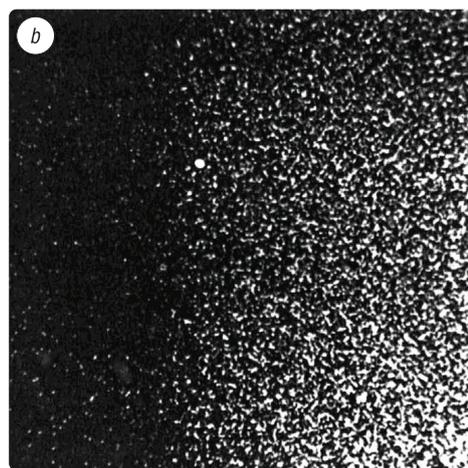
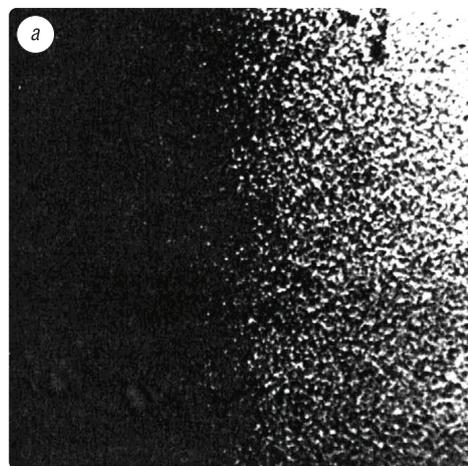


Рис. 5. Микрорентгеноспектральный анализ в никелевом излучении границы раздела двуслойного порошкового железо-никелевого материала, спеченного при температуре 950 °С: а – Fe–Ni, б – (Fe + 1 % NaHCO₃)–Ni

Fig. 5. X-ray microanalysis in nickel radiation of the interface of a two-layer powder-iron-nickel material sintered at a temperature of 950 °C: a – Fe–Ni; b – (Fe + 1 % NaHCO₃)–Ni

С помощью просвечивающей электронной микроскопии на фольге образцов различного состава было установлено (рис. 6), что при введении бикарбоната натрия по границам зерен железа образуются выделения нанодисперсных сложных соединений ферритного типа $\text{Na}_3\text{Fe}_5\text{O}_9$

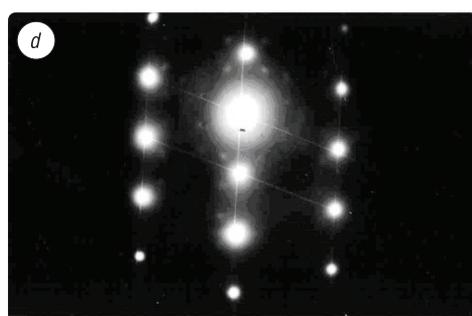
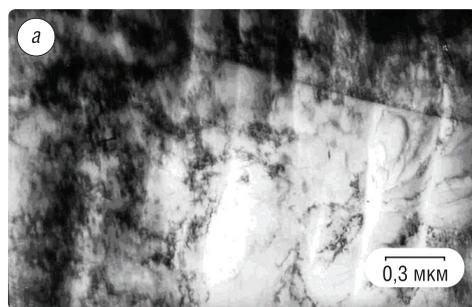


Рис. 6. Структура спеченного при 900 °С порошкового железа с добавкой 0,2 % бикарбоната натрия: *a* – ПЭМ; *b, c, d* – электронограмма: *b* – включение $\text{Na}_3\text{Fe}_5\text{O}_9$, *c* – включение FeO , *d* – включение FeC

Fig. 6. The structure of powder iron with the addition of 0.2 % sodium bicarbonate sintered at 900 °C: *a* – transmission electron microscope; *b, c, d* – electron diffraction pattern: *b* – inclusion of $\text{Na}_3\text{Fe}_5\text{O}_9$; *c* – inclusion of FeO ; *d* – inclusion of FeC

(рис. 6, *b*), оксиды железа типа FeO (рис. 6, *c*) и нестойкие карбиды FeC (рис. 6, *d*), а в местах расположения соединений натрия с помощью исследований, проведенных во вторичных и ОЖЕ-электронах, обнаружены примеси серы, фосфора, кремния (табл. 3).

Рентгеноструктурный анализ показал, что в железе с добавкой бикарбоната натрия происходит сдвиг линий (310), (220), (211) спектра $\alpha\text{-Fe}$ в сторону больших углов, что свидетельствует об уменьшении параметра кристаллической решетки (табл. 4) вследствие рафинирования натрием не только границы, но и тела зерна.

Нанодисперсные выделения способствуют измельчению структуры, средний размер зерна железа, спеченного при 1150 °C, составляет 13 мкм, железа с добавкой 1,0 % бикарбоната натрия – 5 мкм; спеченного при 1250 °C – 20 и 10 мкм соответственно.

Однородная мелкозернистая структура обеспечивает повышение прочности порошковых сталей (рис. 7). Оптимальным содержанием бикарбоната натрия для легированных сталей является 0,5 %.

Введенный в порошковую сталь бикарбонат калия или лития оказывает такое же действие, как и бикарбонат натрия, однако менее эффективное.

Т а б л и ц а 3. Микрорентгеноспектральный количественный анализ участков соединений натрия в спеченном при 900 °C железе с добавкой 0,2 % NaHCO_3

Table 3. Micro X-ray spectral quantitative analysis of sites of sodium compounds in iron sintered at 900 °C with the addition of 0.2 % NaHCO_3

Элемент	Концентрация в участке, %				
	1	2	3	4	5
Na	0,77	1,29	3,31	1,63	8,32
S	0,33	0,52	1,47	0,97	1,94
K	1,49	0,81	2,56	1,04	1,23
Ca	4,39	1,42	2,37	10,50	2,73

Т а б л и ц а 4. Параметр кристаллической решетки (*a*) спеченного при 1150 °C железа

Table 4. The crystal lattice parameter (*a*) of iron sintered at 1150 °C

Материал	θ , град	<i>a</i> , нм
Fe	80,6417	0,28667
	61,9700	0,28674
	49,8460	0,28687
Fe + 0,5 % NaHCO_3	80,7858	0,28654
	62,0127	0,28660
	49,9000	0,28663

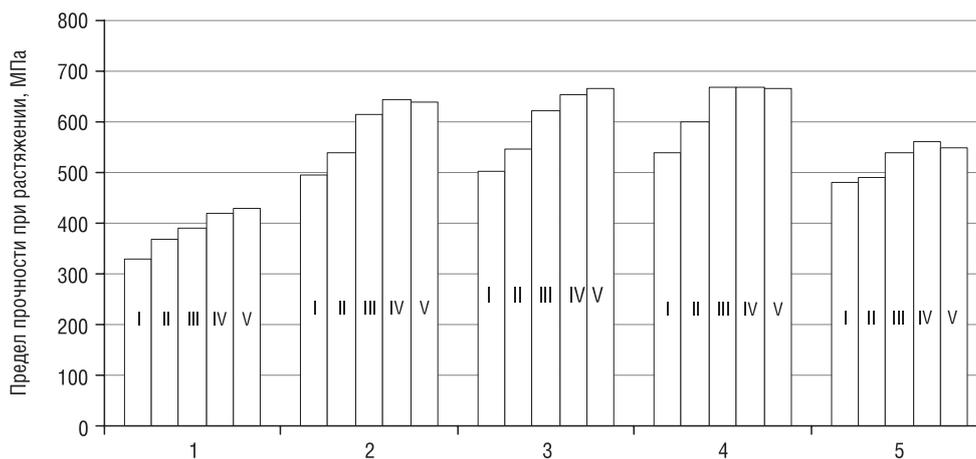


Рис. 7. Влияние добавки бикарбоната натрия на предел прочности при растяжении порошковой стали с 4 % Ni: 1 – 0 % NaHCO_3 , 2 – 0,1 % NaHCO_3 , 3 – 0,2 % NaHCO_3 , 4 – 0,5 % NaHCO_3 , 5 – 1,0 % NaHCO_3 ; I – 900 °C; II – 1000 °C; III – 1100 °C; IV – 1150 °C; V – 1250 °C

Fig. 7. Effect of sodium bicarbonate additive on tensile strength of powder steel with 4 % Ni: 1 – 0 % NaHCO_3 , 2 – 0.1 % NaHCO_3 , 3 – 0.2 % NaHCO_3 , 4 – 0.5 % NaHCO_3 , 5 – 1.0 % NaHCO_3 ; I – 900 °C, II – 1000 °C, III – 1100 °C, IV – 1150 °C, V – 1250 °C

Заклучение. Исследовано влияние активирования процесса спекания порошковой стали, легированной никелем или хромом, за счет диспергирования исходных порошков и введения соединений щелочного металла. Изучена кинетика размла исходных порошков железа, ПХ30 и смеси порошков железа с 4 % никеля, показано, что в зависимости от твердости измельчение порошка происходит в три или две стадии. На первой стадии происходит деформация частиц, возрастают микроискажения, на рентгенограммах наблюдается размытие интерференционных линий, увеличение физического уширения и размера частиц. На второй стадии наклепанные частицы охрупчиваются и разрушаются, при этом происходит интенсивное измельчение частиц, в то время как уширение линий на рентгенограмме и величина микроискажений уменьшаются. На третьей стадии скорость размла падает, достигнув определенной величины, средний размер частиц практически не изменяется, однако вновь наблюдается уширение рентгеновских линий, связанное с увеличением микроискажений, частицы порошка приобретают округлую форму. При размле твердых порошков ПХ30 первая стадия размла отсутствует. Дефекты кристаллической решетки, образующиеся при размле порошков, ускоряют диффузионные процессы, способствуют образованию однородной структуры и снижению на 4–17 % пористости при температуре спекания на 100–200 °C ниже по сравнению с температурой спекания сталей из исходных порошков. Это обеспечивает повышение прочности порошковых сталей в 1,5–1,6 раза.

Установлен механизм воздействия бикарбоната натрия на активацию диффузии углерода, никеля и хрома в железо. Показано, что при введении бикарбоната натрия под действием паров воды, образующихся при разложении бикарбоната натрия, формируются тонкие оксидные пленки на железных частицах, которые активно восстанавливаются в защитно-восстановительной атмосфере. Это способствует образованию металлического контакта между частицами и обеспечивает ускорению диффузии легирующих элементов в железо в 5–7 раз в зависимости от температуры спекания и количества вводимой добавки. Натрий образует по границам зерен железной основы нанодисперсные сложные соединения ферритного типа $\text{Na}_3\text{Fe}_5\text{O}_9$, препятствующие собирательной рекристаллизации и движению дислокаций, способствуя тем самым измельчению структуры. Имея высокое сродство к металлоидам, натрий взаимодействует с примесями (сера, фосфор, кремний), расположенными на границах зерен железа, обеспечивая рафинирование границ зерен и способствуя увеличению сил связи между ними. Образование однородной мелкозернистой структуры, а также более чистых прочных границ зерен позволяет повысить прочность порошковой стали в 1,5–1,7 раз в зависимости от температуры спекания и количества добавки.

Полученные результаты могут быть использованы при получении конструкционных изделий из легированных порошковых сталей.

Список использованных источников

1. Ермаков, С. С. Порошковые стали и изделия / С. С. Ермаков, Н. Ф. Вязников. – М.: Машиностроение, 1990. – 319 с.
2. Reactivity of Carbon Based Materials for Powder Metallurgy Parts and Hard Metal Powders Manufacturing / R. Gilardi [et al.] // *J. Jpn. Society of Powder and Powder Metallurgy*. – 2016. – Vol. 63, № 7. – P. 548–554. <https://doi.org/10.2497/jjspm.63.548>
3. Hryha, E. Effect of Carbon Source on Oxide Reduction in Cr-Prealloyed PM Steels [Electronic resource] / E. Hryha, L. Nyborg, L. Alzati // *Proceedings of the 2012 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Yokohama, 2013/Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 16A-T9-11*. – CD-ROM.
4. Фиалков, А. С. Углерод, слоистые соединения и композиты на их основе / А. С. Фиалков. – М.: Аспект Пресс, 1997. – 718 с.
5. Влияние характеристик углеродосодержащих компонентов шихты на структурообразование и свойства порошковых горячедеформированных сталей. Сообщение 1 / Ю. Г. Дорофеев [и др.] // *Порошковая металлургия*. – 1994. – № 9–10. – С. 94–99.
6. Влияние характеристик углеродосодержащих компонентов шихты на структурообразование и свойства порошковых горячедеформированных сталей. Сообщение 3 / Ю. Г. Дорофеев [и др.] // *Порошковая металлургия*. – 1995. – № 1–2. – С. 119–125.
7. Влияние типа углеродсодержащего компонента и способа формования шихты на химический состав железоуглеродистых материалов / В. Ю. Дорофеев [и др.] // *Металлург*. – 2002. – № 8. – С. 45–47.
8. Еремеева, Ж. В. Особенности применения наноразмерных порошков углерода и хрома на процессы подготовки шихты и прессования порошковых сталей / Ж. В. Еремеева, Н. М. Ниткин, Г. Х. Шарипзянова // *Изв. МГТУ МАМИ*. – 2011. – № 2 (12). – С. 123–127.
9. Активирование процесса спекания железных порошков путем введения нанодисперсных добавок / С. В. Матренин [и др.] // *Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2009. – № 2. – С. 11–16.
10. Дьячкова, Л. Н. Влияние микродобавок на структуру и свойства углеродистой порошковой стали / Л. Н. Дьячкова, Н. П. Глухова, Г. И. Самаль // *Металловедение и терм. обработка металлов*. – 1991. – № 1. – С. 37–39.
11. Анциферов, В. Н. Порошковые легированные стали / В. Н. Анциферов, В. Б. Акименко, Л. М. Гревнов. – М.: Металлургия, 1991. – 318 с.
12. Hryha, E. Effectiveness of reducing agents during sintering of Cr-prealloyed PM steels // *E. Hryha, L. Nyborg // Powder Metallurgy*. – 2014. – Vol. 57, № 4. – P. 245–250. <https://doi.org/10.1179/0032589914Z.000000000192>
13. Мейлах, А. Г. Влияние добавок оксалатов железа, кобальта и никеля на уплотнение при спекании и свойства порошковой меди / А. Г. Мейлах, Р. Ф. Рябова // *Физика и химия обработки материалов*. – 1998. – № 1. – С. 15–19.
14. Ускокович, Д. П. Активированное спекание / Д. П. Ускокович, Г. В. Самсонов, М. М. Ристич. – Белград: Междунар. ин-т науки о спекании, 1974. – 374 с.
15. Либенсон, Г. А. Процессы порошковой металлургии / Г. А. Либенсон, В. Ю. Лопатин, Г. В. Комарницкий. – М.: МИСиС, 2001. – 367 с.
16. Авакумов, Е. Г. Механические методы активации химических процессов / Е. Г. Авакумов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 307 с.
17. Ермилов, А. Г. Интенсификация твердофазных взаимодействий с помощью предварительной механической активации / А. Г. Ермилов // *Известия вузов. Цветная металлургия*. – 1997. – № 1. – С. 53–61.
18. Мейлах, А. Г. Эффективность и механизм активирования спекания порошковой стали за счет добавок меди и углерода / А. Г. Мейлах, Р. Ф. Рябова // *Физика и химия обработки материалов*. – 2002. – № 4. – С. 73–78.
20. Мейлах, А. Г. Активирование спекания порошков Cr–Ni стали добавками порошка графита и ультрадисперсного никеля / А. Г. Мейлах, Р. Ф. Рябова // *Физика и химия обработки материалов*. – 2002. – № 5. – С. 44–49.
21. Браун, М. П. Физика металлов / М. П. Браун. – Киев: Наук. думка, 1986. – 343 с.
22. Райченко, А. И. Диффузионные расчеты для порошковых смесей / А. И. Райченко. – Киев: Наук. думка, 1969. – 102 с.
23. Герцрикен, С. Д. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе / С. Д. Герцрикен, И. Я. Дехтяр. – М.: Физматгиз, 1963. – 320 с.
24. Ивенсен, В. А. Кинетика уплотнения металлических порошков при спекании / В. А. Ивенсен. – М.: Металлургия, 1971. – 269 с.
25. Крашенинников, С. А. Технология соды / С. А. Крашенинников. – М.: Химия, 1988. – 303 с.

References

1. Ermakov S. S. *Powder Steels and Products*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 319 p. (in Russian).
2. Gilardi R., Alzati L., Oro R., Hryha E., Nyborg L., Berg S., Radicchi L. Reactivity of Carbon Based Materials for Powder Metallurgy Parts and Hard Metal Powders Manufacturing. *Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy*, 2016, vol. 63, no. 7, pp. 548–554. <https://doi.org/10.2497/jjspm.63.548>
3. Hryha E., Nyborg L., Alzati L. Effect of Carbon Source on Oxide Reduction in Cr-Prealloyed PM Steels. *Proceedings of the 2012 Powder Metallurgy World Congress & Exhibition, Yokohama, 2013. Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, 16A-T9-11* (CD-ROM).
4. Fialkov A. S. *Carbon, Interlayer Compounds and Composites Based on It*. Moscow, Aspect Press Publ., 1997. 718 p. (in Russian).

5. Dorofeev Yu. G., Dorofeev V. Yu., Ereemeeva J. V., Goncharova T. V. Influence of the characteristics of carbon-containing components of the charge on the structure formation and properties of powder hot-deformed steels. Message 1. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy*, 1994, no. 9–10, pp. 94–99 (in Russian).
6. Dorofeev Yu. G., Dorofeev V. Yu., Ereemeeva J. V., Goncharova T. V. Influence of the characteristics of carbon-containing components of the charge on the structure formation and properties of powder hot-deformed steels. Message 3. *Poroshkovaya metallurgiya = Powder Metallurgy*, 1995, no. 1–2, pp. 119–125 (in Russian).
7. Dorofeev V. Yu., Ereemeeva J. V., Yaitskii D. L., Ufanovskii A. P. Effect of the type of carbon-containing component and the method of forming the charge on the chemical composition of iron-carbon materials. *Metallurgist*, 2002, vol. 46, no. 7–8, pp. 241–243. <https://doi.org/10.1023/a:1020919501675>
8. Ereemeeva J. V., Nitkin N. M., Sharipzyanova G. Kh. Features of the use of nanosized carbon and chromium powders on the processes of preparing the charge and pressing powder steels. *Izvestiya MGTU MAMI*, 2011, no. 2 (12), pp. 123–127 (in Russian).
9. Matrenin S. V., Il'in A. P., Slosman A. I., Tolbanova L. O. Activation of the sintering process of iron powders by introducing nanodispersed additives. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2009, vol. 50, no. 5, pp. 513–517. <https://doi.org/10.3103/s1067821209050149>
10. D'yachkova L. N., Glukhova N. P., Zvonarev E. V., Samal' G. I. Effect of microadditions on the structure and properties of powder carbon steel. *Metal Science and Heat Treatment*, 1991, vol. 33, no. 1, pp. 64–68. <https://doi.org/10.1007/BF00775040>
11. Anciferov V. N., Akimenko V. B., Grevnov L. M. *Alloyed Powder Steels*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 318 p. (in Russian).
12. Hryha E., Nyborg L. Effectiveness of reducing agents during sintering of Cr-prealloyed PM steels. *Powder Metallurgy*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 245–250. <https://doi.org/10.1179/0032589914Z.000000000192>
13. Meilakh A. G., Ryabova R. F. Influence of iron, cobalt and nickel oxalates additives on compaction during sintering and properties of powder copper. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 1998, no. 1, pp. 15–19 (in Russian).
14. Uskokovich D. P., Samsonov G. V., Ristic M. M. *Activated Sintering*. Belgrade, International Sintering Science Institute, 1974. 374 p. (in Russian).
15. Libenson G. A., Lopatin V. Yu., Komarnitsky G. V. *Powder Metallurgy Processes*. Moscow, Moscow Institute of Steel and Alloys, 2001. 367 p. (in Russian).
16. Avakumov E. G. *Mechanical Methods of Activation of Chemical Processes*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1986. 307 p. (in Russian).
17. Ermilov A. G. Intensification of solid-phase interactions using preliminary mechanical activation. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya = Universities' Proceedings. Nonferrous Metallurgy*, 1997, no. 1, pp. 53–61 (in Russian).
18. Meilakh A. G., Ryabova R. F. Efficiency and activation mechanism of sintering of powder steel due to the addition of copper and carbon. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2002, no. 4, pp. 73–78 (in Russian).
20. Meilakh A. G., Ryabova R. F. Activation of sintering of Cr–Ni powders became additives of graphite powder and ultrafine nickel. *Fizika i khimiya obrabotki materialov = Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2002, no. 5, pp. 44–49 (in Russian).
21. Braun M. P. *Physics of Metals*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1986. 343 p. (in Russian).
22. Raichenko A. I. *Diffusion Calculations for Powder Mixtures*. Kiev, Naukova dumka Publ., 1969. 102 p. (in Russian).
23. Herzriken S. D., Dehtyar I. Ya. *Diffusion in Metals and Alloys in the Solid Phase*. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1963. 320 p. (in Russian).
24. Ivensen V. A. *Sintering Kinetics of Metal Powders during Sintering*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 269 p. (in Russian).
25. Krashennnikov S. A. *Soda Technology*. Moscow, Khimiya Publ, 1988. 303 p. (in Russian).

Информация об авторе

Дьячкова Лариса Николаевна – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией, Институт порошковой металлургии имени академика О.В. Романа (ул. Платонова, 41, 220005, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dyachkova@tut.by. <https://orcid.org/0000-0003-1850-6221>

Information about the author

Larisa N. Dyachkova – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory, Academician O. V. Roman Powder Metallurgy Institute (41, Platonov Str., 220005, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dyachkova@tut.by. <https://orcid.org/0000-0003-1850-6221>

И. И. Вегера, А. В. Зизико, П. Ю. Цыкунов, В. М. Якович

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ НАГРЕВА ПРИ ИНДУКЦИОННОЙ ТЕРМООБРАБОТКЕ ВНЕШНИМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Аннотация. На основе результатов расчета и моделирования разработана конструкция индукторов с магнито-проводами, предназначенных для закалки длинномерных плоских деталей. На этапе проектирования данного типа индукторов требовалось определить особенности влияния конструкции магнитопровода на распределение температурного поля при нагреве. Для этого выполнено моделирование электромагнитных и температурных полей для оценки концентрации электромагнитного поля при разной высоте «ножки» индуктора. В результате установлено значительное влияние длины «ножек» магнитопровода на интенсивность нагрева и работоспособность системы в целом. Отмечено, что недостаточная высота «ножки» приводит к значительному снижению концентрации поля, что обуславливает недостаточную температуру нагрева и неравномерность распределения зон тепловыделения в нагреваемой детали. В свою очередь, увеличение высоты «ножек» приводит к сужению зоны тепловыделения в детали по сравнению с суммарной шириной витка и магнитопровода. При значительном удлинении «ножек» контур охлаждения индуктора не сможет отводить тепло из магнитопровода, получаемое от детали, что приводит к разрушению магнитопровода. Разработанная конструкция двухвиткового одноконтурного индуктора и новая методика нагрева позволили получить качественный упрочненный слой глубиной до 3 мм с образованием мартенситной структуры требуемой твердости на плоской детали типа «направляющая» без существенных потерь энергии. Обработка детали производилась путем фиксации ее на жестком основании для компенсации эффекта температурного изменения линейных размеров. Для получения равномерного зазора между деталью и индуктором использовался специальный прижимной ролик. Полученная в итоге структура закаленного слоя в должной мере соответствует заявленным требованиям к детали. Результаты выполненных исследований использованы при разработке плоской детали типа «направляющая» для грузоподъемного оборудования (например, направляющая для движения тяговой цепи) и внедрены в производство.

Ключевые слова: индукционный нагрев, магнитопровод, технология, моделирование, микроструктура, свойства, внешнее электромагнитное поле

Для цитирования: Особенности технологии нагрева при индукционной термообработке внешним электромагнитным полем / И. И. Вегера [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 54–61. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-54-61>

Ivan I. Vegera, Aliaksandr V. Zizika, Pavel Yu. Tsykunou, Viktor M. Yakovich

Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

FEATURES OF HEATING TECHNOLOGY AT INDUCTION THERMAL PROCESSING WITH EXTERNAL ELECTROMAGNETIC FIELD

Abstract. According to the data of performed calculations and modeling of the hardening process, a design of inductors with magnetic cores for hardening long flat parts has been developed. At the design stage of this type of inductors, it was necessary to find out the degree of influence of the magnetic circuit design on the distribution of the temperature field during heating. To do this, we simulated electromagnetic and temperature fields to assess the concentration of the electromagnetic field at different heights of the “legs” of the inductor. As a result, a significant effect of the length of the “legs” of the magnetic circuit on the intensity of heating and the operability of the system as a whole was established. It is noted that insufficient height of the “leg” leads to a significant decrease in the field concentration, which leads to insufficient heating temperature and uneven distribution of heat zones in the heated part. In turn, an increase in the height of the “legs” leads to a narrowing of the heat release zone in the part compared to the total width of the coil and magnetic circuit. With a significant lengthening of the “legs”, the cooling circuit of the inductor will not be able to remove heat from the magnetic circuit obtained from the part, which will lead to the destruction of the magnetic circuit. The developed design of a two-turn single-circuit inductor and the general methodology made it possible to obtain a high-quality hardened layer with a depth of up to 3 mm with the formation of a martensitic structure of the required hardness on a planar-type flat part without significant energy loss. The part was machined by fixing it on a rigid base to compensate for the effect of temperature changes in linear dimensions. To obtain a uniform gap between the part and the inductor, a special pressure roller was used. The resulting structure of the hardened

layer adequately meets the stated requirements for the part. The results of the research were used to develop a flat part of the “guide” type for lifting equipment (for example, a guide for the movement of the traction chain) and were introduced into production.

Keywords: induction heating, magnetic circuit, technology, modeling, microstructure, properties, external electromagnetic field

For citation: Vegera I. I., Zizika A. V., Tsykunou P. Y., Yakovich V.M. Features of heating technology at induction thermal processing with external electromagnetic field. *Vestsi Natsyyanal'nei akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 54–61 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-54-61>

Введение. При необходимости нагрева внешних поверхностей деталей, форма которых отлична от цилиндрической, а также для нагрева внутренних поверхностей в конструкцию индуктора добавляют магнитопроводы, которые уменьшают кольцевой эффект и «выдавливают» магнитное поле на поверхность детали. Магнитопровод – это обладающая высокой магнитной проницаемостью конструкция или сложная деталь, которую применяют в практике индукционного нагрева для перераспределения магнитных полей индуктирующего проводника. В качестве магнитопровода используются магнитомягкие материалы. К ним прежде всего относятся ферриты различного состава (Mn–Zn, Ni–Zn), аморфные металлы (Co, Fe), пермаллои, нанокристаллические механические соединения и т. д. Главной характеристикой таких соединений является магнитная индукция насыщения. Данная величина указывает на «энергоемкость» материала, то есть при бесконечном росте напряженности электромагнитного поля значение магнитной индукции в магнитопроводе не превысит допустимой величины, определяемой свойствами материала [1].

Если поместить медный проводник прямоугольного сечения с переменным током в паз магнитопровода из пластин электротехнического железа, то магнитный поток будет стремиться пройти по пути наименьшего сопротивления, то есть по электромагнитному железу, которое обладает более высокой магнитной проницаемостью. Соответственно ЭДС самоиндукции и сопротивление тока будут больше на участках проводника, прилегающих к магнитопроводу. Следовательно, в проводнике произойдет перераспределение плотности тока по сечению, и ток будет стремиться протекать по стороне проводника, наиболее удаленной от магнитопровода. Таким образом, создание вокруг проводника разомкнутой магнитной цепи (магнитопровода) приводит к перераспределению тока по сечению проводника. В индукционном витке, изготовленном в виде кольца, можно заставить ток протекать не по внутренней, а по внешней стороне витка, поместив его в П-образный магнитопровод, открытой стороной обращенный к внешней части витка.

Индукторы, у которых виток помещен в П-образный магнитопровод с целью «выдавливания» электромагнитного поля, применяются для закалки внутренних отверстий непрерывно-последовательным способом. Ключевой особенностью такого метода закалки, является эффект «полосатости» из-за перепада температуры по высоте, связанный с автоколебаниями при переходе точки Кюри [2, 3], что в итоге приводит к неравномерной твердости закаленного слоя по высоте. В качестве вариантов решения данной проблемы можно рассматривать варьирование скорости вращения и скорости перемещения детали, а также увеличение толщины магнитопровода до некоторого предела (зависящего от режима обработки детали).

Наиболее эффективным способом получения равномерного температурного поля по сечению детали является управление скоростью движения детали и частотой ее вращения. При этом важно контролировать саму скорость и задавать ее такой, чтобы она позволяла получать и поддерживать на поверхности нужную температуру при распределении ее на требуемую глубину.

В настоящее время индукторы с магнитопроводом все чаще используются для поверхностного нагрева плоских поверхностей. Данная оснастка позволяет получать закаленные слои, которые отвечают требованиям конструкторской документации, путем создания равномерного температурного поля на поверхности обрабатываемой детали, так как именно от равномерности поля зависит конфигурация и твердость получаемого упрочненного слоя. Однако зачастую применение таких индукторов сдерживается проблемами разработки их оптимальных конструкций, позволяющих нагревать поверхности сложной формы.

Цель данной работы – поиск эффективных решений по разработке предназначенных для закалики плоских поверхностей индукторов с учетом таких факторов, как: повышение срока службы хрупких элементов индуктора; получение требуемых свойств обрабатываемой поверхности с компенсацией эффекта изменения линейных размеров; получение закалочных структур на нужной глубине без дополнительных средств термообработки.

Методика исследования, материалы и оборудование. Моделирование электромагнитных и температурных полей выполнялось с помощью программы Elcut. Целью моделирования являлась оценка влияния конструкции магнитопровода, в частности высота его «ножек», на распределение электромагнитного поля для получения необходимой концентрации источников тепла в детали. Помимо этого, моделирование требовалось для оценки равномерности температурного поля в детали с применением индуктора предполагаемой конструкции. В качестве экспериментального образца использовалась деталь квадратного сечения 30×30 мм из стали марки 25ХГСА.

Конструирование индуктора авторами произведено с использованием лицензионной программы КОМПАС 3DV17. Для контроля твердости детали применен ультразвуковой твердомер марки ТКМ-459М. Подготовка микрошлифа осуществлена на установке Metcon MICRACUT 125. Структурный анализ полученных шлифов проведен на металлографическом комплексе AutoScan 3.

В качестве материала магнитопровода был выбран ферритовый сердечник марки Epcos E65 с шириной профиля 27 мм, который оптимально подходит для обработки детали шириной 30 мм.

Результаты работы и их обсуждение. Рассмотрим пример создания технологии индукционной термообработки длинномерной плоской детали типа «поперечина». Поперечина изготовлена из стали марки 25ХГСА и представляет собой стандартный профиль квадратного сечения шириной 30 мм и длиной 12 м. Для уменьшения величины изгиба профиля в результате появления послезакалочных сжимающих напряжений деталь приварена к стандартному швеллеру профиля 10П. В соответствии с требованиями чертежа на одной из ее поверхностей шириной 30 мм необходимо получить равномерный закаленный слой твердостью более 40 HRC и глубиной 1,2–2,0 мм.

Ширина профиля магнитопровода сознательно выбиралась меньше ширины обрабатываемой поверхности детали, что позволило исключить перегрев кромок и уменьшить перепад глубины закаленного слоя детали по сечению путем ослабления влияния краевого эффекта. При выборе и изготовлении магнитопровода особое внимание следует уделять величине зазоров между магнитопроводом и витком индуктора, а также между магнитопроводом и деталью. Немаловажным является и расположение магнитопровода на самом витке. Все эти конструктивные особенности влияют на формирование электромагнитного поля и на его концентрацию на поверхности детали.

Для обработки поперечины авторами спроектирован индуктор с магнитопроводом, представленный на рис. 1.

Известно, что высота «ножек» магнитопровода оказывает существенное влияние на концентрацию магнитного поля [4, 5]. На рис. 2, *a* показано, что в случае, когда высота «ножек» магнитопровода (L_1) превышает высоту витка индуктора, магнитные силовые линии обеспечивают необходимую величину магнитного потока в зоне нагрева, а при недостаточной высоте (L_2) происходит заметное рассеивание электромагнитного поля в окружающую среду (рис. 2, *b*), что приводит к снижению плотности тока в нагреваемой детали. В результате снижается интенсивность тепловыделения в обрабатываемой детали и увеличивается продолжительность нагрева.

Температурное поле рассматриваемых случаев представлено на рис. 3. Чрезмерное увеличение высоты ножки приводит к увеличению тепловыделения в зоне значительно меньшей, чем ширина индуктора с магнитопроводом (рис. 3, *a*). В результате при использовании двухвиткового индуктора в промежутке между витками будет наблюдаться падение температуры нагрева детали [5]. Более того, при столь малом зазоре между нагре-

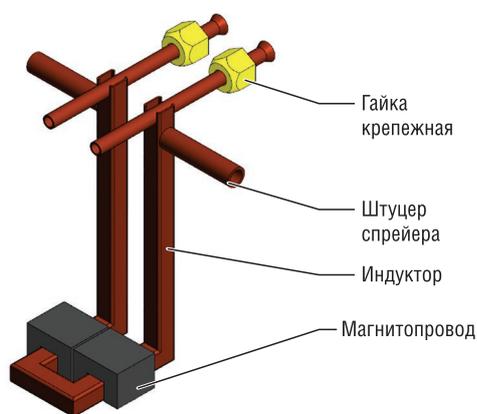


Рис. 1. Индуктор для термообработки детали типа «поперечина»

Fig. 1. Inductor for heat treatment of the cross beam

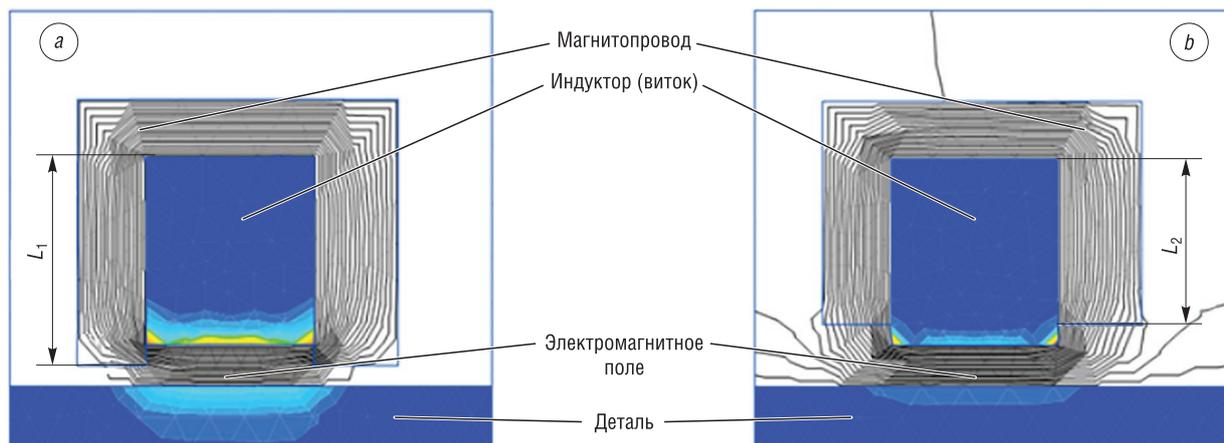


Рис. 2. Распределение электромагнитного поля индуктора при длине «ножки» магнитопровода: *a* – больше высоты профиля индуктора, *b* – меньше высоты профиля индуктора

Fig. 2. Distribution of the electromagnetic field of the inductor when the length of the “legs” of the flux concentrator: *a* – is greater than the height of the profile of the inductor, *b* – is less than the height of the profile of the inductor

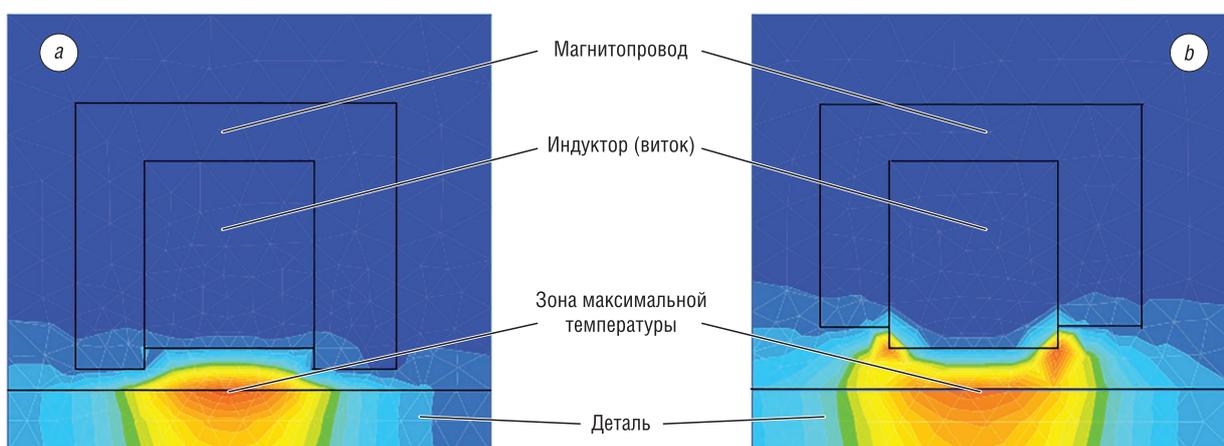


Рис. 3. Температурное поле при индукционном нагреве плоской поверхности при различной высоте ножки магнитопровода. Максимальная температура нагрева на поверхности детали: *a* – 931 °C, *b* – 137 °C

Fig. 3. Temperature field during induction heating of a flat surface at different heights of the legs of the flux concentrator. Maximum heating temperature on the surface of the material: *a* – 931 °C, *b* – 137 °C

ваемой деталью и магнитопроводом последний будет подвергаться излишнему нагреву излучением от детали, а контур охлаждения индуктора не сможет в должной мере отводить тепло. В итоге это приведет к тепловому разрушению магнитопровода.

Уменьшение высоты «ножки» приводит к снижению интенсивности нагрева практически в 5 раз (время нагрева детали одинаковое и равно 5 с). Наблюдается излишняя концентрация тепла на краях индуктора и магнитопровода из-за углового эффекта (рис. 3, *b*). Это может вызвать оплавление краев детали, при этом закаленный слой в середине детали получен не будет. При такой неравномерности электромагнитного поля в результате перегрева и эрозии может выйти из строя индуктор, а также высока вероятность разрушения магнитопровода сильным электромагнитным полем.

Наличие двух витков, осуществляющих нагрев, привело к следующему: первый виток обеспечивал предварительный прогрев детали, а второй виток-спрейер способствовал достижению на поверхности закалочной температуры и охлаждению детали потоком воды (рис. 4).

Если рассмотреть модель температурного поля, формируемого при нагреве данным индуктором, то полученная картина свидетельствует о достаточном прогреве детали на нужную глубину (рис. 5). Перепад температурного поля и уменьшение концентрации электромагнитного поля между ферритами является следствием разнонаправленного движения тока по виткам

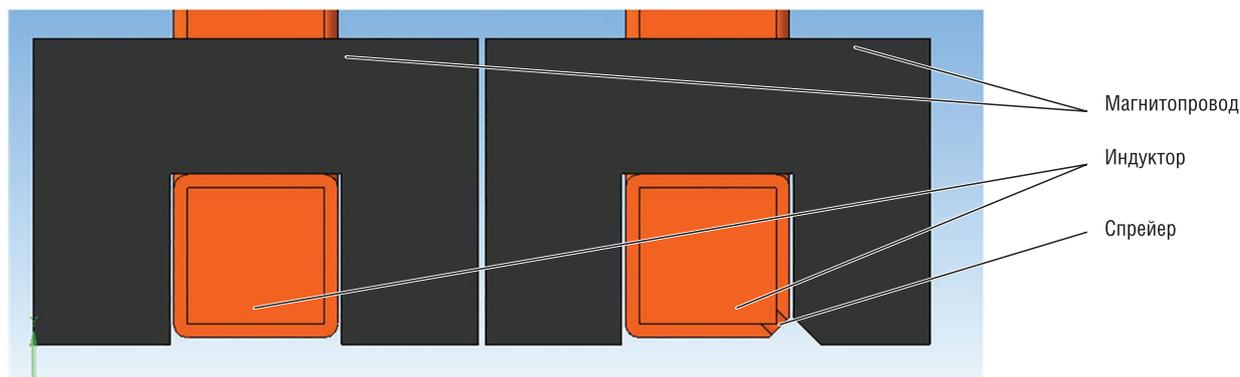


Рис. 4. Расположение витков и спейера в индукторе

Fig. 4. Location of the turns and cooler in the inductor

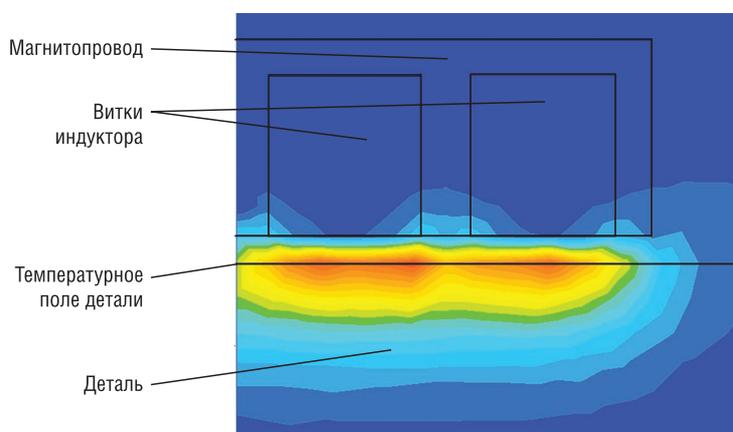


Рис. 5. Температурное поле при поверхностном нагреве поперечины

Fig. 5. Temperature field during surface heating of the cross beam

индуктора. Однако данный температурный градиент нивелируется за счет теплообмена внутренних слоев металла, а также движения заготовки.

Практическое применение результатов работы. На основе результатов расчетов изготовлен новый индуктор, который в своей конструкции имеет два рабочих витка с установленными на них магнитопроводами (см. рис. 1). Это обусловлено необходимостью упрочнения со скоростью не менее 5 мм/с и ограниченной 25 кВт мощностью портативного преобразователя, установленного на резцедержатель строгального станка с ходом станины 12 м, который использовался в качестве устройства, обеспечивающего непрерывно-последовательное перемещение индуктора относительно детали.

Как уже отмечалось, важным фактором стабильности технологии нагрева внешним электромагнитным полем является сохранение зазоров между обрабатываемой деталью и индуктором. В случае уменьшения зазора при обработке длиномерной детали из-за ее кривизны может произойти короткое замыкание витков на деталь, что приведет к выходу из строя оборудования или оплавлению детали. В случае увеличения зазора мы не получим необходимых свойств на поверхности.

Для устранения проблем с неравномерностью нагрева в конструкции индуктора предусмотрены компенсирующие ролики, которые катятся по детали, тем самым обеспечивая равномерный зазор. Кроме того, в конструкцию добавлен приставной спрейер с наклоном рабочей поверхности под углом 40°, позволяющий дополнительно охлаждать не только закаливаемую поверхность, но и боковые кромки, исключая тем самым самоотпуск детали. В итоге изготовлен индуктор, позволяющий получить необходимые свойства поверхности детали в результате процесса термообработки. Рабочий процесс закалки поперечины изготовленным индуктором представлен на рис. 6.

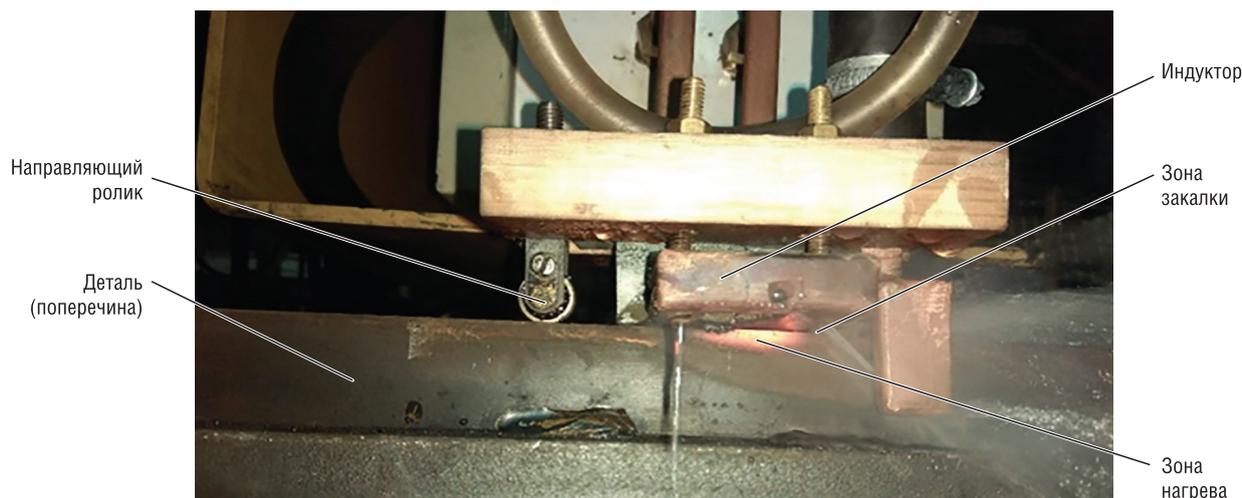


Рис. 6. Процесс закалки детали типа «поперечина» с использованием изготовленного индуктора

Fig. 6. The process of hardening parts of the cross beam type using a manufactured inductor

С использованием новой технологии и оборудования для закалки длинномерных плоских деталей внешним электромагнитным полем на заводе ОАО «Могилевлифтмаш» обработана опытная партия деталей. Макроструктурный анализ упрочненной детали показал, что упрочненный слой имеет равномерную глубину закалки по центру детали не менее 2 мм, на краях – 3,5 мм с твердостью поверхности 46–50 HRC (рис. 7).

Микроструктура упрочненного слоя показана на рис. 8. Упрочненный слой на глубину порядка 0,8–1,0 мм представляет собой гомогенный мартенсит (рис. 8, *b*). На глубине 1,0–1,6 мм в структуре слоя в мартенситной матрице начинают появляться включения нерастворившегося феррита, при этом их количество с глубиной возрастает (рис. 8, *c*). Переходная зона (рис. 8, *d*) представляет собой ферритно-перлитную основу с участком термического влияния и располагается на глубине 1,8–10,0 мм от поверхности детали.

Таким образом, в результате моделирования выявлены особенности нагрева под закалку плоских длинномерных деталей внешним электромагнитным полем методом непрерывно-последовательного индукционного нагрева, которые использованы при создании эффективных технологии и оборудования для получения равномерных по сечению упрочненных слоев с высокой твердостью поверхности.

В 2017 г. в Физико-техническом институте НАН Беларуси совместно с ОАО «Могилевлифтмаш» разработана уникальная технология, спроектирован специальный индуктор с магнитопроводом, изготовлена мобильная индукционная установка мощностью 25 кВт и проведена обработка токами высокой частоты длинномерных направляющих длиной до 12 м. Такие направляющие применяются в новых видах продукции – роторных парковках ПР-10, ПР-12 (рис. 9), на которых возможна парковка соответственно 10 и 12 автомобилей на площади, занимаемой двумя автомобилями.

По обработанным направляющим движется тяговая цепь, к которой закреплены поддоны с автомобилями. Поддоны являются важнейшим элементом безопасности,

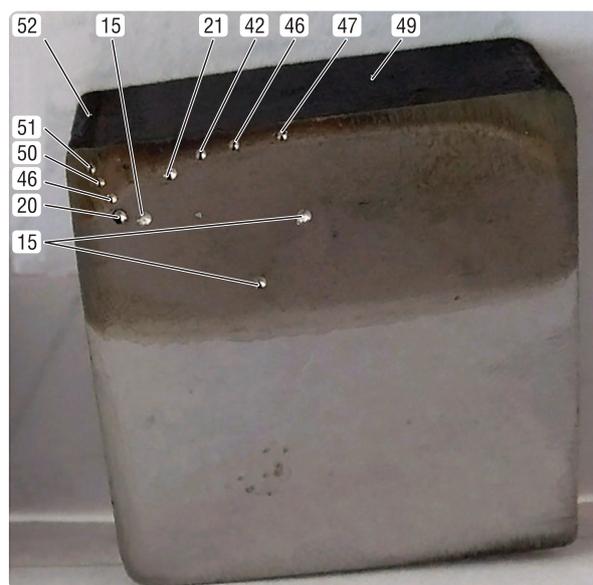


Рис. 7. Распределение твердости (HRC) упрочненного слоя детали «поперечина»

Fig. 7. The distribution of hardness (HRC) of the hardened layer of the part “cross beam”

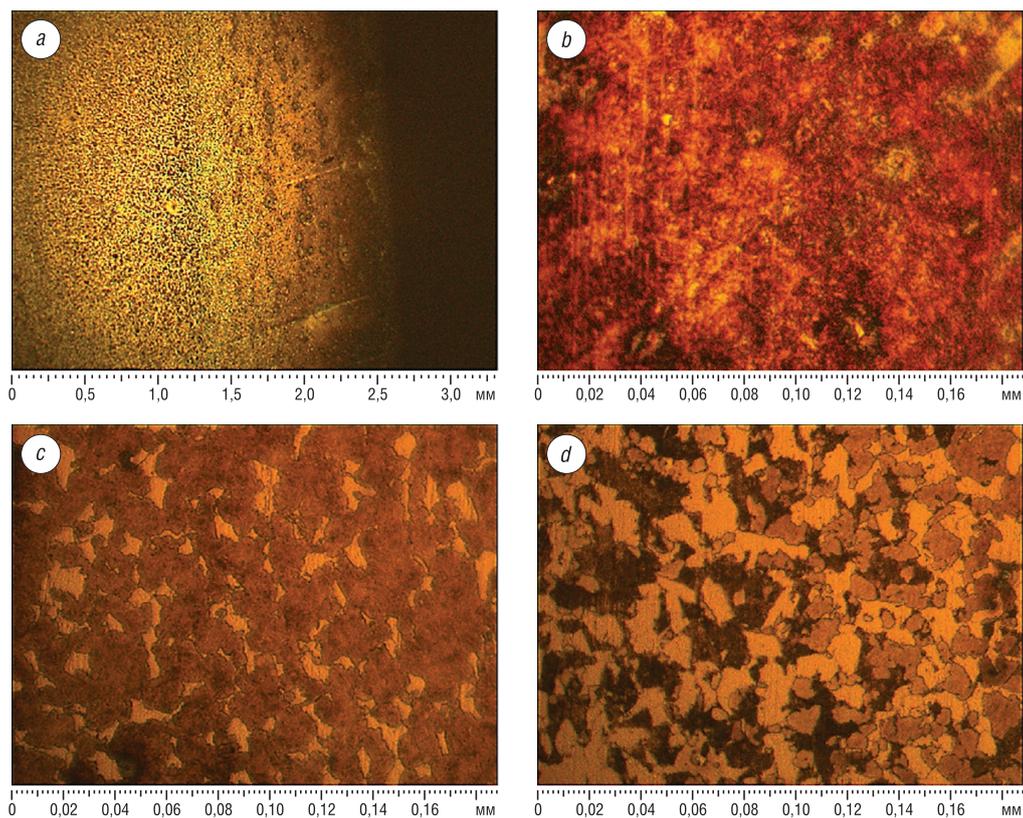


Рис. 8. Микроструктура упрочненного слоя детали: *a* – общий вид, *b* – на глубине 0,8–1,0 мм от поверхности детали, *c* – на глубине 1,0–1,6 мм от поверхности детали, *d* – на глубине 1,8–10,0 мм от поверхности детали

Fig. 8. The microstructure of the hardened layer: *a* – general view, *b* – at a depth of 0.8–1.0 mm from the surface of the part, *c* – at a depth of 1.0–1.6 mm from the surface of the part, *d* – at a depth of 1.8–10.0 mm from the surface of the part



Рис. 9. Парковочный комплекс
Fig. 9. Parking complex

позволяющим сохранить работоспособность парковки даже после разрушения одного звена цепи, поэтому к ним предъявляются высокие требования по прямолинейности (отклонение не более 1 мм на 1 м длины), прочности и износостойкости.

Для обработки партии деталей мобильная индукционная установка мощностью 25 кВт крепилась на резцедержатель строгального станка с ходом станины 12 м для непрерывно-последовательного перемещения детали относительно индуктора. Компьютерное моделирование распределения и концентрации электромагнитного и температурного полей на поверхности деталей обеспечило оптимизацию всех характеристик процесса и позволило создать эффективную технологию и оборудование, позволяющие получать на длинномерных изделиях равномерные по сечению упрочненные слои заданной на чертеже детали глубины и твердостью не менее 46–50 HRC.

Заклучение. На конкретном примере показаны результаты моделирования и конструирования индукторов под нагрев плоских длинномерных поверхностей. Обосновано применение двухвиткового одноконтурного индуктора, оснащенного магнитопроводом. Установлено, что слишком высокая интенсивность нагрева плоских деталей оказывает негативное влияние на прочностные характеристики угловой части деталей, приводящее к скачкообразным изменениям твердости в поперечном сечении детали.

Полученные результаты наглядно показывают полноту требований к технологическому процессу закалки плоских поверхностей. Важно не просто выполнять моделирование нагрева перед изготовлением индуктора, но и выявлять возможные неисправности или ошибки конструирования. Особенно это касается формы магнитопровода. При закалке плоских поверхностей необходимо учитывать деформирование изделия в виде коробления поверхности при отсутствии фиксации необрабатываемой части или же производить симметричную закалку с двух сторон, чем часто на производстве пренебрегают.

Список использованных источников

1. Стародубцев, Ю. Нанокристаллические магнитомягкие материалы / Ю. Стародубцев, В. Белозёров // Компоненты и технологии. – 2007. – № 4. – С. 240–242.
2. Неустойчивость при индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлив [и др.] // Индукционный нагрев. – 2013. – № 1. – С. 36–41.
3. Автоколебания при сканирующем индукционном нагреве магнитной стали / С. В. Дзлив [и др.] // Индукционный нагрев. – 2013. – № 2. – С. 37–43.
4. Слухоцкий, А. Е. Установки индукционного нагрева / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
5. Электрические печи и установки индукционного нагрева / И. И. Фомин, Л. М. Залутовский. – М.: Metallurgia, 1979. – 247 с.

References

1. Starodubtsev U., Belozerov V. Electric furnaces and induction heating plants. Nanocrystalline soft magnetic materials. *Komponenty i tekhnologii = Components and Technologies*, 2007, no. 4, pp. 240–242 (in Russian).
2. Dzljev S. N., Zavorotkin S. V., Zhnakin D. M., Pishalev K. E., Perevalov U. U. Instability during induction heating of magnetic steel. *Induktsionnyi nagrev [Induction Heating]*, 2013, no. 1, pp. 36–41 (in Russian).
3. Dzljev S. N., Zavorotkin S. V., Zhnakin D. M., Pishalev K. E., Perevalov U. U. Self-oscillations in scanning induction heating of magnetic steel. *Induktsionnyi nagrev [Induction Heating]*, 2013, no. 2, pp. 37–43 (in Russian).
4. Slukhotskii A. E., Nemkov V. S., Pavlov N. A. *Induction Heating Plants*. Leningrad, Energoizdat Publ., 1981. 328 p. (in Russian).
5. Fomin I. I., Zalutovskii L. M. *Electric Furnaces and Induction Heating Units*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 247 p. (in Russian).

Информация об авторах

Веґера Иван Иванович – кандидат технических наук, доцент, заведующий отделом индукционных технологий и термической обработки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: smto@tut.by

Зизико Александр Вячеславович – аспирант, заведующий сектором моделирования и опытно-конструкторских работ, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: canr-93@mail.ru

Цыкунов Павел Юрьевич – аспирант, младший научный сотрудник, лаборатория технологий и оборудования индукционного нагрева, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zamaranthz@mail.ru

Якович Виктор Максимович – магистрант, инженер-конструктор, лаборатория поверхностных методов модифицирования материалов, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zrjdbx@mail.ru

Information about the authors

Ivan I. Veģera – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Induction Technologies and Heat Treatments, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: smto@tut.by

Aliaksandr V. Zizika – Master of Engineering, Head of Sector of Modeling and Experimental-Design Works, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: canr-93@mail.ru

Pavel Yu. Tsykunou – Master of Engineering, Junior Researcher, Laboratory of Induction Heating Technology and Equipment, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zamaranthz@mail.ru

Viktor M. Yakovich – Bachelor of Technical Sciences, Design Engineer of the Laboratory Surface Methods of Materials Modification, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zrjdbx@mail.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

УДК 621.86-78:539.3
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-62-71>

Поступила в редакцию 30.01.2020
Received 30.01.2020

В. Я. Прушак, А. П. Дворник

*ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством»,
Солигорск, Республика Беларусь*

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДВУХБАРАБАННОЙ ШАХТНОЙ ПОДЪЕМНОЙ МАШИНЫ

Аннотация. На базе ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» выполнена разработка и налажено импортозамещающее серийное производство двухбарабанных шахтных подъемных машин большой грузоподъемности с увеличенным диаметром навивочных барабанов – до 7 м. Для реализации проекта проведено комплексное исследование всех научно-технических аспектов создания данной техники с учетом материально-технических возможностей предприятий отечественного горного машиностроения. Одним из важных результатов такого исследования стала разработка усовершенствованной методики расчета основных элементов подъемной машины. Методика позволяет рассчитать прочностные параметры наматывающих барабанов, вала, механизма расцепления, элементов привода (сопрягающей муфты), подшипников совместно с принадлежащими анкерными креплениями, приведенные к нормальным условиям эксплуатации и к условиям аварийного обрыва каната. Методика включает расчет напряженно-деформированного состояния элементов навивочных барабанов с помощью метода конечных элементов и позволяет использовать полученные численные данные при моделировании напряженно-деформированного состояния основных узлов подъемной машины для расчета коэффициентов запаса ее прочности в условиях нормальной эксплуатации и в аварийных. Разработанная методика была успешно опробована в конструкторско-технологическом центре ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» при разработке двухбарабанных шахтных подъемных машин с навивочными барабанами большого диаметра для скиповых подъемных установок Петриковского горно-обогатительного комплекса, а также при модернизации существующих подъемных установок на действующих рудниках ОАО «Беларуськалий».

Ключевые слова: аварийная ситуация, барабан, масса, машиностроение, момент, нагружение, подъемная машина, сила, эксплуатация

Для цитирования: Прушак, В. Я. Методика расчета двухбарабанной шахтной подъемной машины / В. Я. Прушак, А. П. Дворник // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 62–71. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-62-71>

Viktor Ya. Prushak, Alexander P. Dvornik

JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production”, Soligorsk, Republic of Belarus

METHOD FOR CALCULATING A TWO-DRUM MINE WINDER

Abstract. In the Republic of Belarus, on the base of JSC “Soligorsk Institute for Resources Saving Problems with Pilot Production”, the development and launch of import-substituting mass production of large-capacity double-drum mine winders with an increased diameter of winding drums up to 7 meters were fulfilled. Earlier, in the post-Soviet space, machines with similar technical characteristics were not produced. Accordingly, for the implementation of the project, a comprehensive study of all the scientific and technical aspects of the creation of this equipment was required, taking into account the material and technical capabilities of the enterprises of domestic mining engineering. One of the important results of this study was the development of an improved methodology for calculating the basic elements of a winder. The technique allows calculating the strength parameters of the winding drums, shaft, disengagement mechanism, drive elements (mating clutch), bearings

together with their anchor fasteners, reduced to normal operating conditions and to conditions of emergency wire breakage. The methodology includes the calculation of the stress-strain state of the elements of the winding drums using the finite element method and allows using the obtained numerical data to simulate the stress-strain state of the main components of the hoisting machine to calculate its safety factors in normal operation and in emergency conditions. The developed methodology was successfully tested in the design and technological center of JSC “Soligorsk Institute for Resources Saving Problems with Pilot Production” during the development of double-drum mine winders with large diameter winding drums for skip hoisting units of the Petrikov mining and processing complex, as well as during the modernization of existing hoisting units at working mines of JSC “Belaruskali”.

Keywords: emergency situation, drum, mass, mechanical engineering, moment, load, hoisting machine, strength, exploitation

For citation: Prushak V. Ya., Dvornik A. P. Method for calculating a two-drum mine winder. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 62–71 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-62-71>

Введение. Стратегическим приоритетом Республики Беларусь является инновационное развитие горного машиностроения. Для обеспечения роста эффективности производства калийных удобрений на ОАО «Беларуськалий» вводятся новые мощности по добыче руды. Поддержание и расширение рудной базы предприятия решалось вовлечением в отработку новых участков и горизонтов Старобинского месторождения калийных солей. С целью увеличения объемов производства построены и введены в эксплуатацию Краснослободский и Березовский рудники, ведется освоение Петриковского месторождения калийных солей, а также выполнены наземные геофизические работы для возведения в дальнейшем седьмого рудника – Дарасинского.

Изначально ОАО «Беларуськалий» комплектовалось исключительно импортными шахтными подъемными установками украинского производства на двигателях постоянного тока 2Ц6×2,8У, БЦК-8/5×2,7, ЦР5×3,2/0,85. Двигатели постоянного тока, используемые на данном оборудовании, сложные, требуют частого обслуживания, что делает их эксплуатацию дорогостоящей. В настоящее время срок эксплуатации большинства таких установок на предприятии составляет от 33 до 59 лет.

Отечественным горным машиностроением до настоящего времени не производились шахтные подъемные установки ввиду отсутствия соответствующего металлообрабатывающего оборудования, опыта изготовления. Но с развитием научного потенциала и технологического оснащения ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» стало возможным изготавливать шахтные подъемные установки в Республике Беларусь.

Постановка задачи исследования. Совершенствованию подъемных установок и разработке теории рудничного подъема уделялось первостепенное внимание на протяжении всей истории развития добычи полезных ископаемых подземным способом [1–3]. Однако практика проектирования и эксплуатации подъемных установок показывает, что технические возможности выбранного оборудования часто остаются недоиспользованными, или в процессе эксплуатации возникают неисправности, влекущие увеличение объема ремонтных работ. Институтом накоплен опыт эксплуатации, ремонта подъемных машин, замены их барабанов и валов.

Вопросы эксплуатации, ревизии и наладки подъемных машин отражены в [3], определения контактных напряжений в зоне работы каната и гладкого барабана и анализа напряженно-деформированного состояния каната, навиваемого на барабан, методом конечных элементов освещены в [4]. В работах [5, 6] приведена теория расчета и конструирования цилиндрических барабанов шахтных подъемных машин конечно-элементным моделированием тонкостенных подкрепленных конструкций в машиностроении по методике Hot Spot Stress, установлена целесообразность применения при их проектировании по упрощенной обобщенно-параметрической модели. В результате использования предложенного подхода возможно получение структурно оптимальной конструкции барабана подъемной машины с возможностью снижения расчетных значений напряжений в зоне концентраций. В [7] определены динамические нагрузки и ресурс одноканатных подъемных машин. Содержащиеся в литературных источниках методики поверочных расчетов работы барабанов ШПМ носят оценочный характер. Но поверочные расчеты реальной подкрепленной конструкции барабана вызывают при конечно-элементном моделировании определенные затруднения из-за проблем с моделированием концентраторов напряжений.

Если рассматривать барабан с точки зрения теории упругости, то для тонких чаще всего применяют гипотезу Кирхгофа–Лява, по которой любое прямое волокно, нормальное к срединной поверхности до деформации, остается прямым и нормальным к срединной поверхности и после деформации. Кроме того, считается, что нормальными напряжениями в направлении, перпендикулярном к срединной поверхности, можно пренебречь по сравнению с основными напряжениями. Решение задачи сводится к интегрированию системы дифференциальных уравнений в частных производных высокого порядка при краевых условиях, определяемых характером сопряжения с другими частями конструкции [8].

Важным этапом при проведении экспертизы подъемных машин для продления сроков их эксплуатации является оценка остаточного ресурса его элементов и устройства в целом. При оценке остаточного ресурса по усталостной кривой достоверность оценки зависит от точности определения эквивалентных напряжений элементов подъемной установки [9]. В действующих методиках оценки остаточного ресурса эквивалентное напряжение принято определять по максимальному напряжению (РД 03-422-01 «Методические указания по проведению экспертных обследований шахтных подъемных установок». М.: ГУП «НТЦ “Промышленная безопасность”», 2001). Тем не менее величины нагрузок в элементах подъемных установок изменяются в течение цикла подъема груза. В рабочем режиме эксплуатации установка осуществляет подъем и спуск груза с разным спектром нагружения.

Определение нагрузок, испытываемых элементами подъемной установки с учетом всех процессов, происходящих при ее работе, при оснащении подъемных машин устройствами для регистрации параметров, системами постоянного контроля параметров в режиме реального времени и в непрерывном мониторинге режимов работы шахтной подъемной установки с двигателями постоянного тока, изменении характеристик, ее элементов и в отслеживании изменения этих характеристик с течением времени и с учетом наработанных методов расчетов напряженно-деформированного состояния барабанов подъемных машин, дает возможность определять эквивалентные напряжения элементов установки на участке равномерного движения, использовать их в системах безопасности при эксплуатации действующих шахтных подъемных установок [10].

Поэтому актуальной остается задача совершенствования методов расчета и проектирования шахтных подъемных установок, использования приводов переменного тока, новых материалов для подъемных машин с целью обеспечения рациональных технических характеристик, экономии материальных ресурсов и электроэнергии.

Методика расчета шахтных подъемных машин в нормальных и аварийных режимах. Подъемные машины с двумя цилиндрическими навивочными барабанами (рис. 1) применяются для однослойной навивки каната на двухскиповых и двухклетевых подъемах, а также для однососудных подъемов с противовесом. Один навивочный барабан, называемый фиксированным, жестко закреплен на коренном валу. Второй навивочный барабан, называемый переставным,

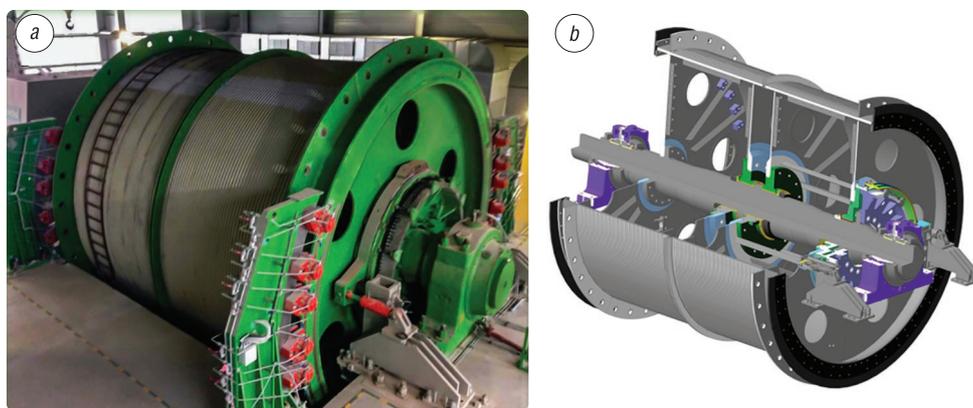


Рис. 1. Двухбарабанная шахтная подъемная машина 2Ц-7×3,2: *a* – установка подъемной машины на Петриковском ГОКе, *b* – схема крепления барабанов на главном валу

Fig. 1. Double-drum winder 2Ts-7×3.2: *a* – installation of the winder at the Petrikovsky mining and processing plant, *b* – the scheme of fixing the drums on the main shaft

установлен на валу посредством скользящих подшипников и соединен с валом путем специального соединения – пружинно-гидравлического расцепного устройства зубчатого типа. Вал приводного электродвигателя, который соединен с главным (коренным) валом подъемной машины с помощью зубчатой муфты, установлен на двух скользящих подшипниках. Подъемная машина оснащена парой дисковых гидравлических тормозов. Тормозные приводы взаимодействуют с тормозными дисками навивочных барабанов машины.

Обечайка, выполненная в виде цилиндра, вальцованного из толстолистового металла, относится к осесимметричным цилиндрическим конструкциям, воспринимающим внешние равномерно-распределенные нагрузки по всей образующей обечайки или ее части от действия натяжения канатов. Лобовины частей барабана соединяются с главным валом двумя внешними и двумя внутренними ступицами вала при помощи болтов. Лобовины привариваются непрерывными сварными швами к участку обечайки.

Предлагаемая методика прочностного расчета двухбарабанной подъемной машины выполнена как для условий нормальной эксплуатации, так и для условий аварии, то есть для случая обрыва подъемного каната.

В качестве исходных в расчетах используются следующие параметры подъемной машины: глубина подъема, H , м; диаметр наматывающего барабана, D , мм; максимальная статическая сила, действующая в канате, S , кН; максимальный статический перевес ΔS , кН; максимальный статический момент M_S , кН·м; диаметр несущего каната d_n , мм; удельная масса каната q_n , кг/м; минимальная сила обрыва несущего каната $P_{z\min}$, кН; максимальная сила обрыва несущего каната $P_{z\max}$, кН; максимальная скорость движения подъемного сосуда v , м/с; максимальное ускорение при движении сосуда a , м/с²; угол наклона каната при контакте с поверхностью барабана (в вертикальной плоскости) α , град; высота от оси барабана подъемной машины до оси отклоняющего шкива h , м; расстояние от оси барабана подъемной машины до оси отклоняющего шкива l , м.

Методикой предусматривается определение максимальной статической силы в канате и статического перевеса. При этом для условия полного сосуда на уровне околоствольного двора определяются следующие параметры:

сила, действующая в канате на нагруженной стороне на уровне околоствольного двора:

$$S_1 = \frac{(m_c + m_{kc} + m_{гр} + m_{кн})g}{1000}, \text{ кН},$$

где m_c – масса сосуда, кг; m_{kc} – масса подвесной конструкции сосуда, кг; $m_{гр}$ – масса груза, кг; $m_{кн}$ – масса каната, кг; g – ускорение свободного падения Н/кг;

сила, действующая в канате на стороне без нагрузки на уровне околоствольного двора:

$$S_2 = (m_c + m_{kc})g/1000, \text{ кН};$$

статический перевес для условия полного сосуда на уровне околоствольного двора:

$$\Delta S_1 = S_1 - S_2, \text{ кН};$$

статический момент на валу при нахождении полного сосуда на уровне околоствольного двора:

$$M_S = \Delta S \frac{D}{2}, \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Для условия полного сосуда на уровне устья шахтного ствола рассчитываются следующие показатели:

сила, действующая в канате на нагруженной стороне на уровне устья шахтного ствола:

$$S_3 = (m_c + m_{kc} + m_{гр})g/1000, \text{ кН};$$

сила, действующая в канате на стороне без нагрузки на уровне устья шахтного ствола:

$$S_4 = (m_c + m_{kc} + m_{кн})g/1000, \text{ кН};$$

статический перевес при нахождении полного сосуда на уровне устья шахтного ствола:

$$\Delta S_2 = S_3 - S_4, \text{ кН}.$$

Для условия перестановки барабана определяются следующие параметры:
сила, действующая в канате на уровне околоствольного двора на стороне без нагрузки:

$$S_{pB} = (m_c + m_{kc} + m_{кн})g/1000, \text{ кН};$$

статический момент на валу при перестановке барабана:

$$M_{spB} = S_{pB} \frac{D}{2}, \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Определение предельной силы, приводящей к обрыву каната, осуществляется в соответствии с требованиями «Правил промышленной безопасности при разработке подземным способом соляных месторождений Республики Беларусь» (Постановление МЧС Республики Беларусь от 30 августа 2012 г. №45, с изменениями от 10 апреля 2014 №10), согласно которым минимальная сила, необходимая для обрыва каната, равна

$$P_{zr \min} = n_u S, \text{ кН},$$

где n_u – нормативный запас прочности по максимальной статической нагрузке.

Максимальная сила для обрыва каната определяется по формуле

$$P_{zr \max} = \frac{P_{zr \min}}{\eta}, \text{ кН},$$

где η – эмпирический коэффициент.

Исходными параметрами для расчета привода являлись:
статический момент на главном валу подъемной машины:

$$M = \Delta S \frac{D}{2}, \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

частота вращения барабана (вала):

$$n_B = \frac{v}{\pi D}, \text{ об/с}.$$

При расчетах используются следующие параметры нагрузки:

моменты инерции вращающихся элементов машины (узла главного вала, J_{BW} , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; барабана, J_B , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; двигателя, J_S , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; зубчатой муфты, J_{sz} , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; канатного колеса, J_{kl} , $\text{кг} \cdot \text{м}^2$);
масса, приведенная к диаметру наматывания каната и вычисляемая по формуле

$$m_z = \frac{4J}{D^2}, \text{ кг};$$

где J – момент инерции одного из вращающихся элементов машины, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Общая приведенная масса подъемной машины рассчитывается следующим образом:

$$m_{zmc} = m_{zBW} + m_{zs} + m_{zsz}, \text{ кг},$$

где m_{zBW} – приведенная масса узла главного вала совместно с футеровкой, кг; m_{zs} – приведенная масса двигателя, кг; m_{zsz} – приведенная масса зубчатой муфты, кг.

При расчете нагрузки на двигатель для условий нормальной эксплуатации принимаются во внимание следующие параметры:

статический момент нагрузки двигателя M_S ;

максимальное перетяжеление (избыточная динамическая масса) при пуске машины:

$$\Delta S_d = \Delta S \left(1 + \frac{a}{g} \right), \text{ кН};$$

динамический момент нагрузки на двигатель:

$$M_d = \Delta S_d \frac{D}{2}, \text{ кН} \cdot \text{м}.$$

Нагрузка на двигатель для аварийных условий определяется следующими параметрами: временная задержка для обрыва каната (пустой сосуд на уровне устья ствола):

$$b = \frac{P_{zr} - S_1}{(m_{zmc} + Hq_n + m'_1 + 2m_{zkl} + 2(h+l)q_n)}, \text{ м/с}^2,$$

где m'_1 – масса нагруженной стороны приведенная к канату на уровне околоствольного двора, кг; крутящий момент для обрыва каната:

$$M_{sa1} = (P_{zr} - (m_{zkl} + (h+l+H)q_n + m_{zB}))b \frac{D}{2}, \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где m_{zkl} – приведенная масса канатного колеса, кг; m_{zB} – приведенная масса барабана совместно с футеровкой, кг;

крутящий момент вала для обрыва каната:

$$M_{sa2} = (S_1 + (m_1 + m_{zkl} + (h+l)q_n + m_{zB}))b \frac{D}{2}, \text{ кН} \cdot \text{м},$$

усилия, действующие на барабаны:

$$S_{a1} = \frac{2M_{sa1}}{D}, \text{ кН};$$

$$S_{a2} = \frac{2M_{sa2}}{D}, \text{ кН};$$

$$x = \frac{S_{a1} + S_{a2}}{P_{zr}}.$$

Прочностные расчеты для фиксированного и переставного барабанов выполняются с помощью метода конечных элементов на основании многослойных расчетов.

Усилие нажима, вызванного воздействием каната на поверхность барабана, определяется по формуле

$$p = \frac{2S}{Ds}, \text{ кПа},$$

где s – шаг укладки каната, м.

Сила, действующая вдоль оси барабана при нормальных условиях эксплуатации, равна

$$S_{pr} = S_r \sin(\alpha), \text{ кН},$$

где α – максимальный угол наклона каната при контакте с поверхностью барабана; S_r – максимальная статическая сила в канате, кН.

Сила, действующая вдоль оси барабана при аварийных условиях эксплуатации, рассчитывается по выражению

$$S_{pa} = S_z \sin(\alpha), \text{ кН},$$

где S_z – сила, необходимая для обрыва каната, кН.

Касательная сила при нормальных условиях эксплуатации:

$$S_{sr} = S_r, \text{ кН}.$$

Касательная сила при аварийных условиях:

$$S_{pa} = S_z, \text{ кН},$$

Число витков, на которые воздействует сила обрыва каната, определяется следующим образом:

$$i = \frac{\ln \frac{S_z}{S_r}}{\mu 2\pi}.$$

Угол обхвата равен

$$\beta = i \cdot 360^\circ.$$

Разработанная методика была использована на ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» при проектировании двухбарабанной шахтной подъемной машины 2Ц-7×3,2, а также при модернизации подъемных машин, установленных ранее на рудниках ОАО «Беларуськалий». Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния переставного барабана шахтной подъемной машины 2Ц-7×3,2 в условиях нормальной эксплуатации и в аварийных условиях (обрыв каната) представлены на рис. 2. Результаты моделирования напряженно-деформированного состояния фиксированного барабана указанной шахтной подъемной машины показаны на рис. 3. В таблице приведены полученные численные значения напряжений и деформаций элементов барабанов, полученных для стали S355J2 (европейский стандарт EN 10 025-2) со следующими прочностными параметрами: предел прочности $R_m = 450$ МПа, предел текучести $R_e = 295$ МПа, предел выносливости $Z_{go} = 230$ МПа.

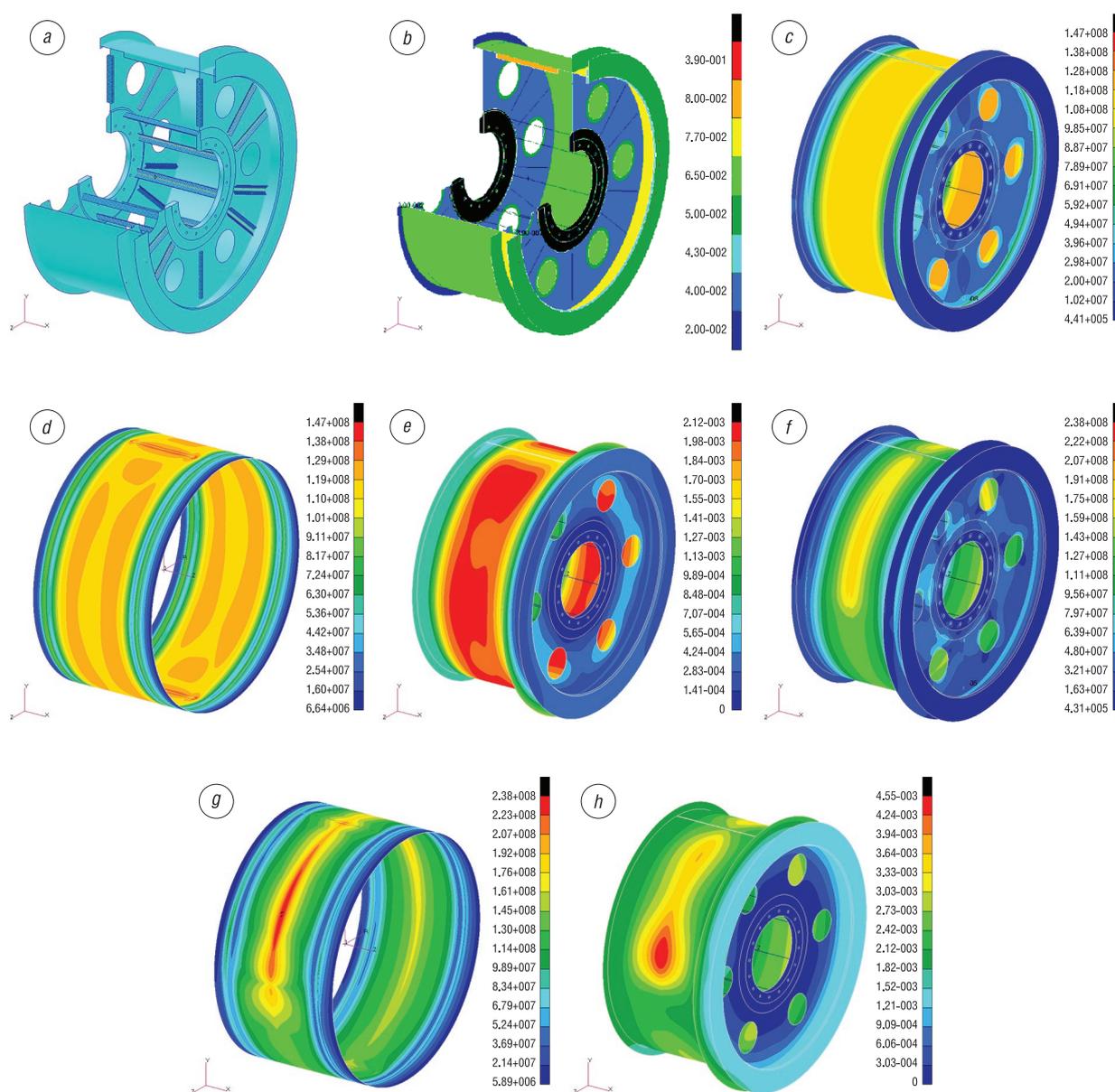


Рис. 2. Результаты моделирования напряжений и деформаций переставного барабана: *a* – модель барабана, *b* – карта толщины металла, *c* – карта напряжений барабана, *d* – карта напряжений обечайки, *e* – карта деформаций, *f* – карта напряжений барабана в аварийных условиях, *g* – карта напряжений обечайки барабана в аварийных условиях, *h* – карта деформаций барабана в аварийных условиях

Fig. 2. Simulation results of stresses and strains of the adjustable drum: *a* – model of the drum, *b* – map of thickness of the metal, *c* – map of stresses of the drum, *d* – map of stresses in the shell, *e* – map of deformations, *f* – map of tension of the drum in an emergency, *g* – map of stresses of the drum shell in an emergency, *h* – map of deformations of the drum in an emergency

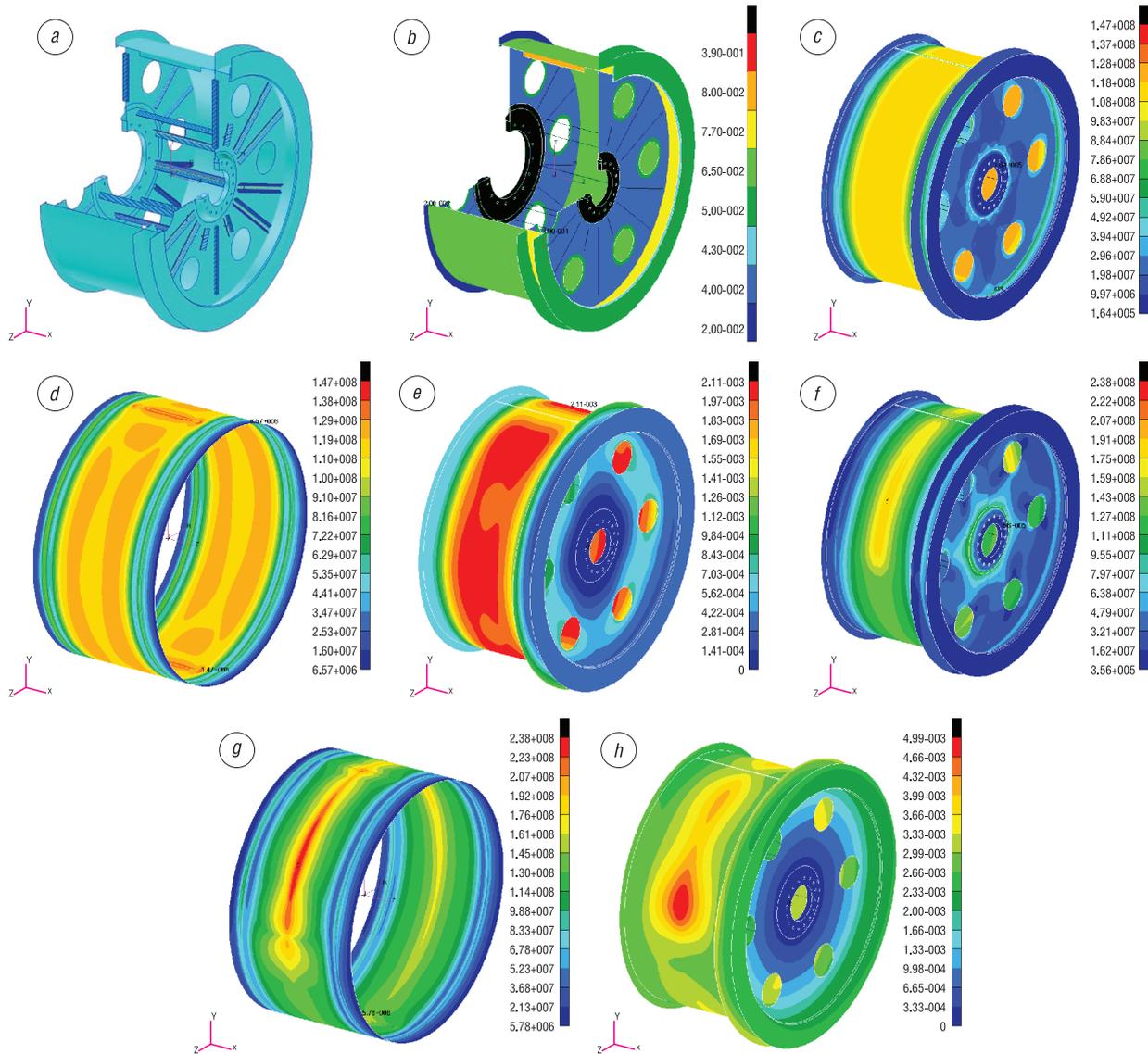


Рис. 3. Результаты моделирования напряжений и деформаций фиксированного барабана: *a* – модель барабана, *b* – карта толщины металла, *c* – карта напряжений барабана, *d* – карта напряжений обечайки, *e* – карта деформаций барабана, *f* – карта напряжений барабана в аварийных условиях, *g* – карта напряжений обечайки барабана в аварийных условиях, *h* – карта деформаций барабана в аварийных условиях

Fig. 3. Simulation results of stresses and strains of a fixed drum: *a* – model of the drum, *b* – map of thickness of the metal, *c* – map of stresses of the drum, *d* – map of stresses in the shell, *e* – map of deformations, *f* – map of tension of the drum in an emergency, *g* – map of stresses of the drum shell in an emergency, *h* – map of deformations of the drum in an emergency

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния навивочных барабанов
Results of the calculation of the stress-strain state of the winding drums

Тип барабана	Составные части барабана	Эксплуатационные условия		Аварийные условия	
		напряженности, МПа	деформации, мм	напряженности, МПа	деформации, мм
Переставной	Барабан в целом	147	2,12	238	4,55
	Обечайка	147			
	Боковые диски	101			
	Ступицы	76,9			
Фиксированный	Барабан в целом	147	2,11	238	4,99
	Обечайка	147			
	Боковые диски	104			
	Ступицы	90,7			

На основании полученных численных данных напряженно-деформированного состояния элементов навивочных барабанов рассчитываются коэффициенты запаса прочности основных узлов подъемной машины по пределу прочности и пределу текучести материала применительно к условиям нормальной эксплуатации по формулам:

$$n_m = \frac{R_m}{\sigma},$$

$$n_{go} = \frac{Z_{go}}{\sigma},$$

где σ – максимальное расчетное напряжение, МПа.

Применительно к условиям аварийного обрыва каната коэффициенты запаса прочности основных узлов подъемной машины по пределу текучести определяют следующим образом:

$$n_e = \frac{R_e}{\sigma}.$$

Заключение. В рамках проведенного исследования разработана оригинальная методика расчета двухбарабанных шахтных подъемных машин, оборудованных навивочными барабанами большого диаметра. Методика включает расчет напряженно-деформированного состояния элементов этих барабанов при нормальных условиях эксплуатации и в условиях аварийного обрыва каната с помощью метода конечных элементов и позволяет использовать полученные численные данные при моделировании напряженно-деформированного состояния основных узлов подъемной машины для расчета коэффициентов запаса ее прочности в условиях нормальной эксплуатации и аварийных. Данная методика была успешно опробована в конструкторско-технологическом центре ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» при разработке двухбарабанных шахтных подъемных машин с навивочными барабанами большого диаметра (7 м) для Петриковского горно-обогатительного комплекса, а также при модернизации существующих подъемных установок на действующих рудниках ОАО «Беларуськалий».

Полученные результаты свидетельствуют о необходимости проведения дальнейших исследований при использовании современного полупроводникового электропривода, микропроцессорной системы управления, защиты, диагностики и контроля с развитым интерфейсом «человек–машина» на скиповых подъемных установках, а также обоснования динамических режимов движения сосудов в стволе в масштабе реального времени, проведения исследований сил сопротивления движению подъемных сосудов для обеспечения эффективности и безопасности подъемных машин.

Список использованных источников

1. Завозин, Л. Ф. Шахтные подъемные установки / Л. Ф. Завозин. – М.: Недра, 1975. – 367 с.
2. Белый, В. Д. Шахтные многоканатные подъемные машины / В. Д. Белый, И. С. Найденко. – М.: Недра, 1964. – 447 с.
3. Руководство по ревизии, наладке и испытанию шахтных подъемных установок / под общ. ред. В. А. Корсуна, Г. Д. Трифанова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2014. – 616 с.
4. Фидровская, Н. Н. Анализ напряженно-деформированного состояния каната, навиваемого на барабан, методом конечных элементов / Н. Н. Фидровская, А. А. Ломакин, А. С. Писарцов // *Машинобудування: зб. наук. праць.* – Харків, 2016. – № 17. – С. 52–58.
5. Заболотный, К. С. Разработка теории расчета и конструирования цилиндрических барабанов шахтных подъемных машин / К. С. Заболотный, А. Л. Жупиев, М. А. Рутковский; М-во образования и науки Украины, Нац. горн. ун-т. – Днепр: НГУ, 2016. – 166 с.
6. Заболотный, К. С. Конечно-элементное моделирование тонкостенных подкрепленных конструкций в машиностроении / К. С. Заболотный, Е. В. Панченко // *Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер.: Електротехніка і енергетика.* – Донецк, 2017. – № 1 (18). – С. 87–94.
7. Стрелков, М. А. Определение динамических нагрузок и ресурса одноканатных шахтных подъемных установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.05.06 / М. А. Стрелков; Перм. гос. техн. ун-т. – Екатеринбург, 2011. – 17 с.
8. Зверьяев, Е. М. Конструктивная теория тонких упругих оболочек / Е. М. Зверьяев // *Препринты ИПМ им. М. В. Келдыша.* – 2016. – № 33. – 25 с.
9. Попов, Ю. Методика определения остаточной ресурсности элементов и узлов шахтных подъемных машин (ШПМ) / Ю. Попов, С. Тимухин // *Горн. информ.-аналит. бюлл. Спец. вып.: Экономика и экономические науки; Горное дело; Организация и управление; Охрана окружающей среды; Экология человека.* – 2014. – № 6.
10. Современные системы безопасности при эксплуатации действующих шахтных подъемных установок / Г. Д. Трифанов [и др.] // *Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та.* – 2011. – Вып. 1. – С. 173–188.

References

1. Zavozin L. F. *Mine Hoisting Units*. Moscow, Nedra Publ., 1975. 367 p. (in Russian).
2. Belyi V. D., Naidenko I. S. *Mine Multi-Rope Winders*. Moscow, Nedra Publ., 1964. 447 p. (in Russian).
3. Korsun V. A., Trifanov G. D., eds. *Guide to the Revision, Adjusting and Testing of Mine Hoisting Installations*. Perm', Publishing House of the Perm National Research Polytechnic University, 2014. 616 p. (in Russian).
4. Fidrovskaia N. N., Lomakin A. A., Pisarcov A. S. Analysis of the stress-strain state of a rope wound on a drum by the finite element method. *Mashinobudovannyya: zbornik naukovikh prats'* [Engineering: Collection of Scientific Papers]. Kharkov, 2016, no. 17, pp. 52–58 (in Russian).
5. Zabolotnyi K. S., Zhupiev A. L., Rutkovskii M. A. *Development of the Theory of Calculation and Design of Cylindrical Drums of Mine Hoisting Machines*. Dnepr, National Mining University, 2016. 166 p. (in Russian).
6. Zabolotny K. S., Panchenko E. V. Finite-element modeling of thin-walled reinforced structures in mechanical engineering. *Naukovi pratsi Donets'kogo Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu. Seriya: Elektrotekhnika i energetika* [Scientific Works of Donetsk National Technical University. Series: Electrical Engineering and Power Engineering]. Donetsk, 2017, no. 1 (18), pp. 87–94 (in Russian).
7. Strelkov M. A. *Determination of Dynamic Loads and the Resource of Single-Rope Mine Hoisting Installations*. Ekaterinburg, Perm State Tech. University, 2011. 17 p. (in Russian).
8. Zvereyaev E. M. Constructive theory of thin elastic shells. *Preprinty IPM im. M. V. Keldysha* [Preprints of M. V. Keldysh Institute of Applied Mathematics], 2016, no. 33. 25 p. (in Russian).
9. Popov Y., Timukhin S. Methodology for determining the residual life of elements and components of mine hoisting machines. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' Spetsial'nyi vypusk: Ekonomika i ekonomicheskie nauki; Gornoe delo; Organizatsiya i upravlenie; Okhrana okruzhayushchei sredy; Ekologiya cheloveka* [Mining Information and Analytical Bulletin. Special issue: Economics and economic sciences; Mining engineering; Organization and management; Environmental protection; Human ecology], 2014, no. 6 (in Russian).
10. Trifanov G. D., Knyazev A. A., Trifanov M. G., Strelkov M. A. Modern security systems for the operation of existing mine hoisting installations. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Perm National Research Polytechnic University], 2011, iss. 1, pp. 173–188 (in Russian).

Информация об авторах

Прушак Виктор Яковлевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, академик Евразийской академии горных наук, доктор технических наук, профессор, директор, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: ipr@sipr.by

Дворник Александр Петрович – кандидат технических наук, начальник отдела научно-технической информации, ЗАО «Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством» (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: onti@sipr.by

Information about the authors

Viktor Ya. Prushak – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Academician of the Eurasian Academy of Mining Sciences, D. Sc. (Engineering), Director, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: ipr@sipr.by

Alexander P. Dvornik – Ph. D. (Engineering), Head of the Department of Scientific and Technical Information, JSC “Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production” (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: onti@sipr.by

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

УДК 539.25

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-72-82>

Поступила в редакцию 10.10.2019

Received 10.10.2019

**Г. Б. Мельникова¹, В. А. Лапицкая¹, Т. А. Кузнецова¹,
Т. Н. Толстая¹, С. А. Чижик^{1,2}, Д. А. Котов³**

¹*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
Минск, Беларусь*

²*Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*

³*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь*

**ВЛИЯНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПЛАЗМЫ
АТОСФЕРНОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА МЕМБРАН
ЭРИТРОЦИТОВ И ТРОМБОЦИТОВ**

Аннотация. Низкотемпературная плазма атмосферного барьерного разряда (ПБР) применяется для лечения различных типов заболеваний и повреждения кожи и мягких тканей; однако механизм взаимодействия ПБР с биологическим материалом к настоящему моменту точно не установлен. Одним из перспективных методов, позволяющих оценить изменения структуры и свойств мембран клеток на наноуровне, является атомно-силовая микроскопия (АСМ). В данной работе представлены результаты влияния ПБР на структуру и свойства эритроцитов и тромбоцитов. АСМ-методом изучены морфометрические и локальные механические свойства поверхности клеток, что является одним из характеристических параметров оценки изменений, происходящих на молекулярном уровне с клеточной мембраной. Авторами использовался экспериментальный комплекс для генерации низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда на основе устройства коаксиального типа и регулируемой мощностью источника от 10 до 30 Вт. Установлено изменение структуры мембран эритроцитов с сохранением формы самих клеток. Для эритроцитов, высушенных на воздухе, отмечается резкий рост силы адгезии после воздействия ПБР. На поверхности эритроцитов и тромбоцитов установлено наличие частиц субмикронного размера, что может быть следствием выхода содержимого клетки или разрушительного воздействия плазмы на белки наружного слоя мембраны. Фиксированные 0,5%-ным раствором глутарового альдегида на подложках слюды образцы клеток сохраняют свою дисковидную форму и структуру мембраны, что может быть связано с образованием ковалентных сшивок между липидами мембраны и глутаровым альдегидом, а также остаточным содержанием жидкости в объеме клетки после взаимодействия с химическим реагентом. Эритроциты являются более устойчивыми к кратковременному воздействию ПБР (1 мин) по сравнению с тромбоцитами. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при установлении закономерностей и протекания биохимических процессов под воздействием ПБР на клетки крови.

Ключевые слова: эритроциты, тромбоциты, атомно-силовая микроскопия, структура, низкотемпературная плазма диэлектрического барьерного разряда, сила адгезии

Для цитирования: Влияние воздействия низкотемпературной плазмы атмосферного барьерного разряда на структуру и свойства мембран эритроцитов и тромбоцитов / Г. Б. Мельникова [и др.] // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 72–82. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-72-82>

**Galina B. Melnikova¹, Vasilina A. Lapitskaya¹, Tatyana A. Kuznetsova¹,
Tatyana N. Tolstaya¹, Sergei A. Chizhik^{1,2}, Dmitrii A. Kotov³**

¹*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

²*Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

³*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus*

**INFLUENCE OF THE LOW-TEMPERATURE PLASMA OF THE ATOSPHERIC BARRIER DISCHARGE
ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF THE MEMBRANES ERYTHROCYTES AND PLATELETS**

Abstract. The plasma of the atmospheric barrier discharge (PBR) is used to treat various types of diseases and damage to the skin and soft tissues; however, the mechanism of interaction of PBR with biological material has not been precisely established to date. One of the promising methods for estimation changes in the structure and properties of cell membranes at

the nanoscale is atomic force microscopy (AFM). In this article the results of the influence of the barrier discharge low-temperature plasma on the structure and properties of erythrocytes and platelets are presented. By the AFM-method, the shape, morphology of membranes, and adhesive forces on the surface of the cells were determined, which is one of the characteristic parameters for assessing changes occurring at the molecular level with the cell membrane. In this work, we used an experimental complex for generating a low-temperature plasma of a dielectric barrier discharge based on a coaxial type device and an adjustable source power from 10 to 30 W. A change in the structure of the erythrocyte membranes without changing the shape of the cells themselves was established. On the non-fixed erythrocytes, the adhesion force is increased after exposure. On the surface of both erythrocytes and platelets, the presence of particles of submicron size was established, which may be due to the release of cell contents or the destructive effect of plasma on the proteins of the outer layer of the membrane. The cells, which are fixed with a 0.5-mm solution of glutaraldehyde on mica substrates, both retain their disk-like shape and membrane structure, which may be due to the formation of covalent cross-links between membrane lipids and glutaraldehyde, and residual liquid content in the cell volume after interaction with a chemical reagent. Red blood cells are more resistant to short-term exposure to PBR (1 minute) compared with platelets. The results of the studies can be used to establish patterns and the biochemical processes under the influence of PBR on blood cells.

Keywords: erythrocyte, platelets, atomic force microscopy, structure, low temperature plasma, dielectric barrier discharge, adhesion force

For citation: Melnikova G. B., Lapitskaya V. A., Kuznetsova T. A., Tolstaya T. N., Chizhik S. A., Kotov D. A. Influence of the low-temperature plasma of the atmospheric barrier discharge on the structure and properties of the membranes erythrocytes and platelets. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 72–82 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-72-82>

Введение. Развитие и доступность экспериментального оборудования и источников низкотемпературной атмосферной плазмы барьерного разряда (ПБР) позволило проводить большое количество исследований, связанных с воздействием плазмы на клеточные культуры, клетки крови и различные типы биологических тканей [1]. ПБР может быть использована для лечения повреждений кожи и мягких тканей, заживления ран различного происхождения путем активации иммунных клеток и фибробластов кожи, и, как следствие, увеличения выработки коллагена, обеззараживания поверхностей и стерилизации термочувствительных материалов [2–4]. При данном типе обработки происходит взаимодействие электронов высокой энергии с объектом исследования, что приводит к деструкции поверхностных углеводных структур клеток, увеличению гидрофобности мембран и внутриклеточного pH [5]. Электроны высокой энергии вступают в столкновения с фоновым газом, в результате чего инициируются процессы диссоциации, возбуждения и ионизации [6, 7]. Ионы остаются относительно «холодными», плазма не вызывает термических повреждений [8].

На основании проведенных к настоящему времени исследований воздействия плазмы на биологические клетки определен механизм свободно-радикального окисления белков, которое приводит к образованию различных производных аминокислот – модифицированных остатков триптофана, продуктов неферментативного гликозилирования белков, битирозина. Выявлено снижение уровня молекулярных продуктов перекисного окисления липидов. Установлено, что после воздействия в клетках преобладают пиридиновые нуклеотиды в окисленном состоянии. Показано, что белки грамположительных бактерий подвергаются более выраженной окислительной модификации, чем белки грамотрицательных бактерий.

С использованием метода сканирующей электронной микроскопии продемонстрировано набухание прокариотических и эукариотических клеток, что связано с нарушением водно-солевого баланса и отслоением клеточной стенки, а также установлены метаболические изменения у прокариотических клеток [5, 9].

Так, в работе [5] проводили воздействие низкотемпературной плазмой. Излучение осуществляли с помощью экспериментального устройства ПИЛИМИН серии ИР-10 (производство НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, Россия; характеристики используемого разряда: емкость импульсного конденсатора $C = 3,3$ нФ, балластное сопротивление $R = 10$ МОм, напряжение источника питания $U_{и.п} = 11$ кВ, частота повторения импульсов – 10 Гц) на бактериальные штаммы антибиотикорезистентных грамположительных микроорганизмов *Staphylococcus aureus* 5913 и грамотрицательных микроорганизмов *Escherichia coli* 775-3. Установлено, что воздействие излучением плазмы искрового разряда в течение 60 с обладает бактерицидным действием в отношении

грамположительных и грамотрицательных бактерий. Происходит снижение концентрации продуктов перекисного окисления липидов, что может служить причиной нарушения нормального функционирования клетки и способствовать ее гибели. После воздействия излучением плазмы на суспензии бактериальных клеток возрастает гидрофобность мембран в клетках, что обусловлено преобладанием пиридиновых нуклеотидов в окисленном состоянии и может приводить к блокированию работы дегидрогеназ и электрон-транспортной цепи.

Исследователями также было изучено влияние низкотемпературной газоразрядной плазмы на состояние цитоплазматической мембраны эритроцитов [9, 10]. Воздействие проводили на экспериментальном устройстве, генерирующем низкотемпературную плазму с уникальной плотностью частиц до $10^{22} \text{ (см}^2\text{с)}^{-1}$, которое разработано в Российском федеральном ядерном центре – Всероссийском НИИ экспериментальной физики (г. Саров). Энергия, подводимая к разрядному промежутку, равнялась 5 Дж в 1 импульсе, длительность импульса составила 1–10 мкс, импульсы повторялись с частотой 1 Гц. Установлено, что в результате воздействия источником плазмы в течение 15 мин изменяется форма клеток, после 30 мин – уменьшается количество внутриклеточного содержимого во всех эритроцитах. Вероятнее всего, для данного типа плазмы основным действующим фактором являлось УФ-излучение, его воздействие приводило к увеличению активных форм кислорода, лизису клеток и накоплению внутриклеточного содержания гемоглобина. Однако механизм действия холодной плазмы на клетки крови остается дискуссионным, в значительной мере зависит от силы воздействующего источника и типа плазмы и требует дальнейших исследований.

Одним из перспективных методов оценки эффектов воздействия ПБР на клеточные мембраны является атомно-силовая микроскопия (АСМ), которая позволяет оценить изменение структуры поверхности мембраны [11] и ее адгезионные свойства [12], что является одним из характеристических параметров оценки изменений, происходящих на молекулярном уровне с клеточной мембраной. АСМ позволяет подобрать силы, приложенные к зонду, которые не вызывают сдвига определенных частиц или клеток на подложке [13, 14], подобрать параметры воздействия ПБР, меняющие гидрофильные свойства поверхности с одновременным контролем шероховатости [15], а также дает возможность определять изменение свойств поверхности с течением времени после обработки в ПБР.

Цель работы – изучение структуры и физико-механических, включая адгезионные, свойств поверхности мембран эритроцитов и тромбоцитов до и после воздействия низкотемпературной ПБР.

Материалы и методы исследований. Тромбоциты выделяли путем центрифугирования венозной крови, стабилизированной 3,8%-ным раствором цитрата натрия ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$), в течение 10 мин при 2000g. Одну часть полученной обогащенной тромбоцитарной плазмы наносили на пластины слюды, вторую фиксировали в 1,5 мл 0,5%-ного буферного раствора глутарового альдегида ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$, производитель Sigma-Aldrich) в течение 30 мин. Путем центрифугирования суспензии в течение 10 мин при 2000g отделяли фиксированные тромбоциты от плазмы крови. Супернатант отбирали, а к осадку добавляли 700 мкл сульфида свинца (PbS), ресуспендировали и центрифугировали 10 мин при 2000g, повторяли два раза. Затем к осадку добавляли 700 мкл дистиллированной воды, ресуспендировали и центрифугировали 10 мин при 2000 g, процедуру проводили дважды.

Эритроциты для исследований выделяли из стабилизированной $\text{K}_3\text{ЭДТА}$ венозной крови доноров. Венозную кровь центрифугировали 3 мин при 90g. Отделяли плазму, а полученный осадок трехкратно отмывали фосфатным буфером PbS (Phosphate Buffered Saline, производитель Sigma-Aldrich). Одну часть эритроцитарной массы наносили на пластины слюды, вторую (3 мкл суспензии эритроцитов) фиксировали в 700 мкл 0,5%-ного буферного раствора $\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$ в течение 30 мин. После фиксации отделяли эритроциты центрифугированием в течение 3 мин при 90g. К полученному осадку добавляли 700 мкл PbS, ресуспендировали и центрифугировали 3 мин при 90g, процедуру повторяли два раза, затем отмывали в 700 мкл дистиллированной воды, ресуспендировали и центрифугировали 3 мин при 90g, процедуру проводили дважды. Осадок с фиксированными клетками (эритроцитами и тромбоцитами) наносили на пластинки слюды размером 1×1 см. Образцы высушивали на воздухе при комнатной температуре.

Для проведения плазменной обработки использовался экспериментальный комплекс, разработанный в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, в состав которого входят разрядная система, система питания и система подачи рабочего газа (рис. 1, *a*). Газ непрерывно прокачивают через разрядную систему, удаляя тем самым из зоны разряда тепло, возбужденные частицы и продукты различных плазмохимических реакций, которые, как правило, ухудшают устойчивость и характеристики разряда. Возникший диффузный разряд при атмосферном давлении создает однородную плазму по всему объему межэлектродного промежутка.

Диэлектрический барьерный разряд формируется в устройстве коаксиального типа (рис. 1, *b*), которое конструктивно состоит из диэлектрической трубки с металлическими электродами внутри и снаружи ее. Кварцевая трубка имеет внешний диаметр 8 мм. Внутренний электрод представляет собой полый металлический стержень диаметром 1,0 мм. Внешний электрод состоит из медной фольги, плотно прилегающей к кварцевой трубке, шириной 10 мм. Данная разрядная система позволяет формировать плазменный факел длиной до 3 см с зоной обработки диаметром 1 см. В качестве плазмообразующего газа использовался аргон.

Основным элементом системы питания устройства генерации плазмы атмосферного разряда является блок питания. Система питания позволяет изменять параметры в диапазоне частот от 20 до 100 кГц и выходное напряжение от 3 до 10 кВ. Мощность источника плазмы составляла 10–30 Вт. Возможность регулировать параметры (мощность, напряжение и др.) плазмы позволяет подвергать обработке как металлы, так и биологические ткани. Снижение интенсивности плазмы до минимального порога осуществления диэлектрического барьерного разряда дает возможность воздействовать напрямую на отдельные клетки, не разрушая их.

С помощью разработанного комплекса обрабатывали образцы клеток в течение 1 мин. Расстояние от источника до образца было равно 20 мм.

Взаимодействие низкотемпературной плазмы с мембраной клеток (рис. 2, *a*) может вызывать различные биологические эффекты, которые до конца не изучены. При генерации низкотемпературной плазмы диэлектрического барьерного разряда происходят процессы диссоциации, ионизации, возбуждения и рекомбинации атомов и молекул [16], приводящие к появлению активных форм кислорода и азота, образованию свободных радикалов (рис. 2, *b*). Свободные радикалы вступают во взаимодействие с мембраной биологических клеток, частично прикрепляются

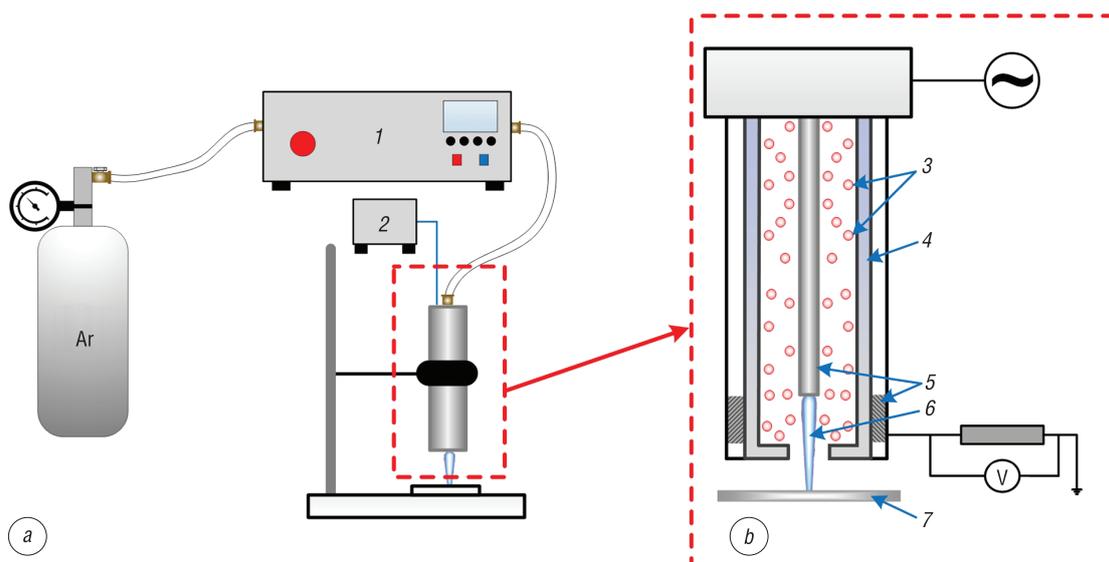


Рис. 1. Структурная схема установки (*a*) и разрядной системы коаксиального типа с диэлектрическим барьерным разрядом (*b*): 1 – регулятор расхода газа и блок управления, 2 – источник питания, 3 – поток газа (аргон), 4 – диэлектрик (кварц), 5 – электроды, 6 – плазма, 7 – образец

Fig. 1. Structural diagram of the installation (*a*) and the discharge system of a coaxial type with a dielectric barrier discharge (*b*): 1 – gas flow regulator and control unit, 2 – power supply, 3 – gas flow (argon), 4 – dielectric (quartz), 5 – electrodes, 6 – plasma, 7 – sample

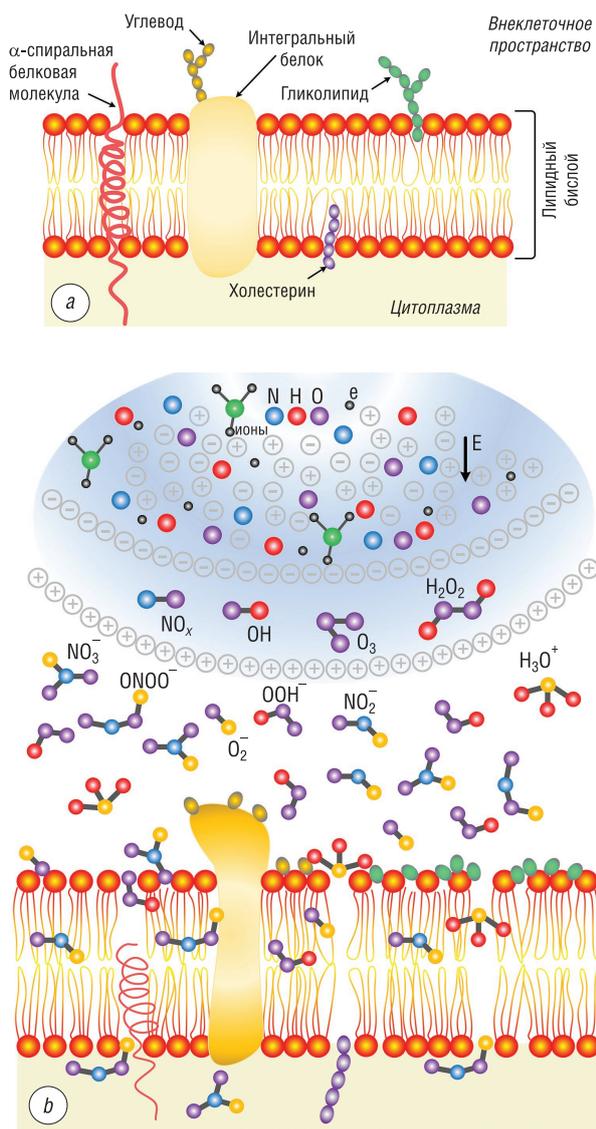


Рис. 2. Структурная схема мембраны клетки до воздействия плазмой (а) и схематичное представление воздействия плазмы диэлектрического барьерного разряда на мембрану клетки (б)

Fig. 2. The structural diagram of the cell membrane before plasma exposure (a) and a schematic representation of the effect of plasma dielectric barrier discharge on the cell membrane (b)

более сглаженные по сравнению с фиксированными образцами. Поры имеют вытянутую форму, в чем-то напоминающую «устыца», которые образуются между структурными элементами поверхности мембраны. В нативном состоянии данное строение обеспечивает эластичное состояние мембраны. Белки плазматической мембраны расположены на ее поверхности или пронизывают липиды, обеспечивая прочность и вязкость мембран. Количество пор на единицу поверхности меньше по сравнению с фиксированными клетками и варьируется от 100 до 340 нм. Шероховатость мембраны при этом незначительно выше у нефиксированных клеток (табл. 1). Мембрана фиксированных образцов имеет развитую поверхность, диаметр пор гораздо меньше (40–60 нм). Это обусловлено образующимися сшивками между глутаровым альдегидом и аминокеттами белков мембраны клетки. Регулярность глобул, выявляемых АСМ-зондом, может отражать строго упорядоченное расположение структурных элементов эритроцитарного цитоскелета.

к поверхности мембраны, частично проходят сквозь мембрану или остаются в липидном бислое и в итоге приводят к выходу белка и клеточного материала на поверхность мембраны, изменению структуры самой мембраны, изменению формы самой клетки и др.

Исследования структуры, распределения значений сил адгезии и шероховатости по поверхности мембран клеток проводили на АСМ Dimension FastScan (Bruker, США) в режиме PeakForce QNM с использованием стандартных кремниевых кантилеверов типа MPP-12120-10 (Bruker, США) с радиусом закругления острия 42 нм и жесткостью консоли 5,8 Н/м. Режим PeakForce QNM (Quantitative NanoMechanics), расширенное название Peak Force Tapping Mode, позволяет качественно получать карты и количественно измерять такие свойства материала, как модуль упругости, адгезия, деформация и диссипация в наномасштабе. Поскольку в режиме Peak Force Tapping Mode происходит постоянный контроль силы, с которой зонд воздействует на образец, глубина деформации образца очень мала и не превышает нескольких нанометров. В каждой точке изображения зонд совершает «подвод-отвод» к поверхности образца с записью силовых кривых. Получение и запись таких кривых, по которым автоматически идет пересчет значений механических свойств (модуль упругости, адгезия и др.) с учетом характеристик используемого зонда, и является основой работы режима PeakForce QNM.

Результаты и обсуждение. На основании АСМ-анализа контрольного образца эритроцитов (без воздействия ПБР) установлено, что нефиксированные глутаровым альдегидом клетки имеют сферообразную форму, фиксированные – дисковидную (рис. 3). Диаметр эритроцитов составляет 7,0 мкм.

Мембраны нефиксированных клеток бо-

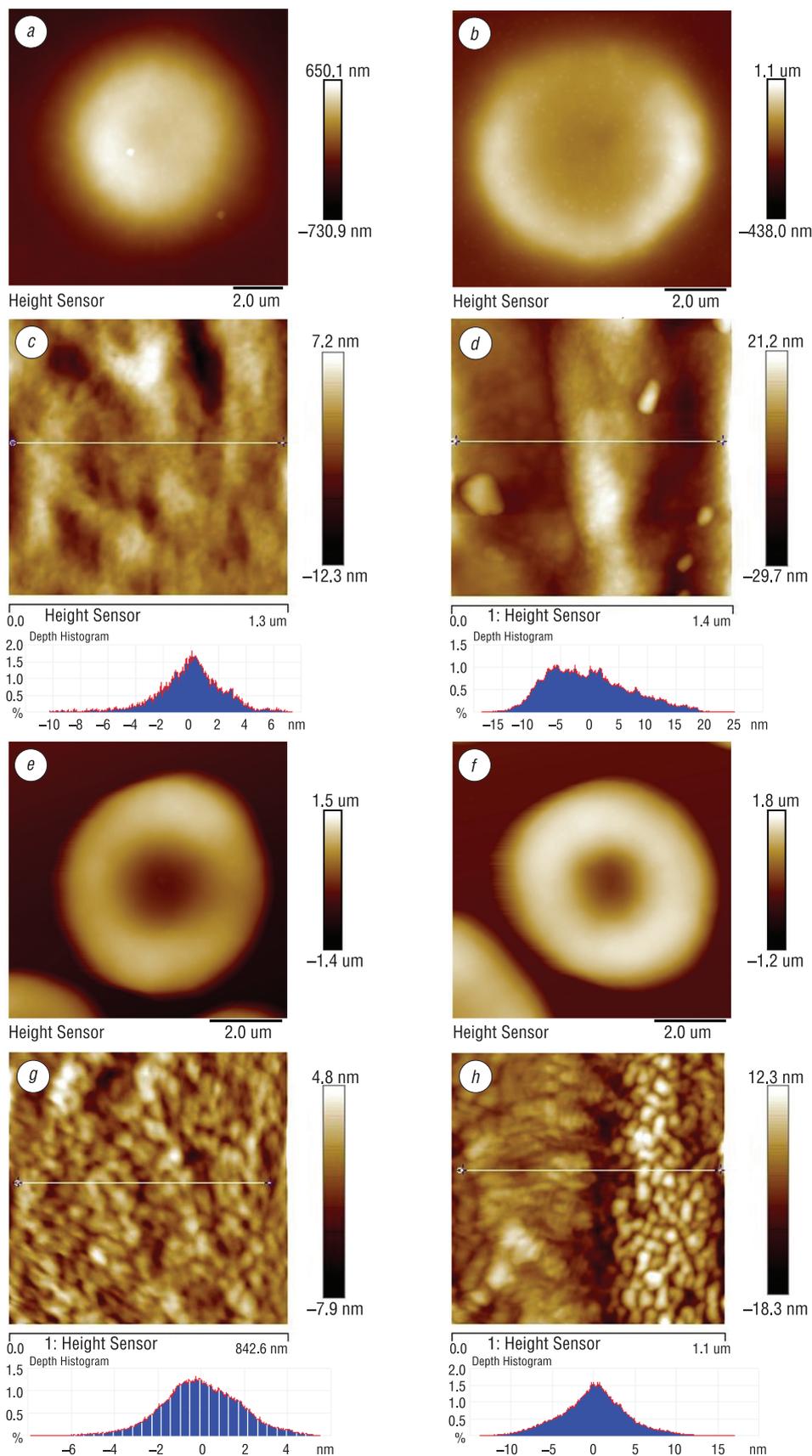


Рис. 3. Структура нефиксированных (a–d) и фиксированных (e–h) эритроцитов до (a, c, e, g) и после (b, d, f, h) обработки плазмой барьерного разряда

Fig. 3. The structure of unfixed (a–d) and fixed (e–h) erythrocytes before (a, c, e, g) and after (b, d, f, h) treatment of barrier discharge plasma

Т а б л и ц а 1. Изменение шероховатости поверхности мембран клеток до и после обработки плазмой диэлектрического барьерного разряда

T a b l e 1. Change in the roughness of the surface of cell membranes before and after treatment of barrier discharge plasma

Клетки плазмы крови	Шероховатость на фиксированном образце, нм						Шероховатость на нефиксированном образце, нм					
	до обработки			после обработки			до обработки			после обработки		
	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz	Ra	Rq	Rz
Эритроциты	1,4	1,8	3,5	3,1	3,9	5,2	1,7	2,3	4,3	5,8	7,1	15,2
Тромбоциты	5,8	8,1	34,1	10,1	13,1	12,4	2,1	2,6	5,1	115,0	146,0	491,0

В результате воздействия ПБР на нефиксированные эритроциты изменяется структура мембран клеток, при этом их форма не изменяется (см. рис. 3, *b*). Также увеличивается шероховатость поверхности (см. рис. 3, *c, d, g, h*; табл. 1). Для мембраны характерна складчатая форма, также отмечается наличие конгломератов диаметром 130–150 нм на ее поверхности, что, по-видимому, связано с выбросом клеточного материала в результате избыточного давления изнутри, создаваемого в процессе воздействия (см. рис. 3, *d*).

Фиксированные образцы (см. рис. 3, *e–h*) сохраняют свою дисковидную форму и структуру мембраны, что может быть объяснено защитным действием глутарового альдегида, а также незначительным содержанием жидкости в объеме клетки после взаимодействия с химическим реагентом.

В результате воздействия ПБР на нефиксированные глутаровым альдегидом эритроциты отмечается резкий рост значений силы адгезии от 5,11 до 37,39 нН по сравнению с фиксированными клетками: от 3,35 до 9,53 нН (табл. 2). Полученный характер изменений связан со структурными особенностями мембран клеток, а также белковыми трансформациями, возможными процессами перекисного окисления липидов в случае нефиксированных клеток, нарушением водно-солевого баланса внутри клетки. Разница в значениях между двумя типами образцов обусловлена большим содержанием внутриклеточной жидкости в нефиксированных клетках.

Структура тромбоцитов представлена на рис. 4. Клетки имеют шарообразную форму диаметром 4–5 мкм. Для поверхности нефиксированных клеток характерна более рыхлая развитая структура мембран по сравнению с фиксированными образцами.

После обработки ПБР установлен выход содержимого мембраны на подложку для нефиксированных и фиксированных глутаровым альдегидом клеток. Происходит значительный рост шероховатости поверхности мембран у нефиксированных тромбоцитов (см. рис. 4, *c, d, g, h*; табл. 1). Для мембран тромбоцитов, нефиксированных глутаровым альдегидом, значения силы адгезии составляют 4,32 нН, после воздействия ПБР значения данного параметра незначительно уменьшились до 3,91 нН (см. табл. 2). Для клеток, фиксированных глутаровым альдегидом, воздействие ПБР приводит к уменьшению значений данного параметра от 7,21 до 5,85 нН.

Для эритроцитов и тромбоцитов было установлено наличие частиц на поверхности клетки. Дополнительно изучалось влияние ПБР на плазме крови донора. Для этого каплю плазмы крови наносили на поверхность слюды и воздействовали также в течение 1 мин ПБР. Установлено наличие объектов таких же морфологии и размеров (рис. 5).

На основании полученных результатов структуры и изменений значений силы адгезии можно предположить возможное разрушительное воздействие плазмы на белки наружного слоя мембраны исследуемых клеток за счет их свободно-радикального окисления после воздействия ПБР. Однако для подтверждения данного предположения необходимо проведение ряда дополнительных исследований.

Т а б л и ц а 2. Изменение силы адгезии поверхности мембран клеток до и после обработки плазмой диэлектрического барьерного разряда

T a b l e 2. Change in the adhesion force of the surface of cell membranes before and after treatment of barrier discharge plasma

Клетки плазмы крови	Сила адгезии на фиксированных образцах, нН		Сила адгезии на нефиксированных образцах, нН	
	до обработки	после обработки	до обработки	после обработки
Эритроциты	3,35	3,53	5,11	37,39
Тромбоциты	7,21	5,85	4,32	3,91

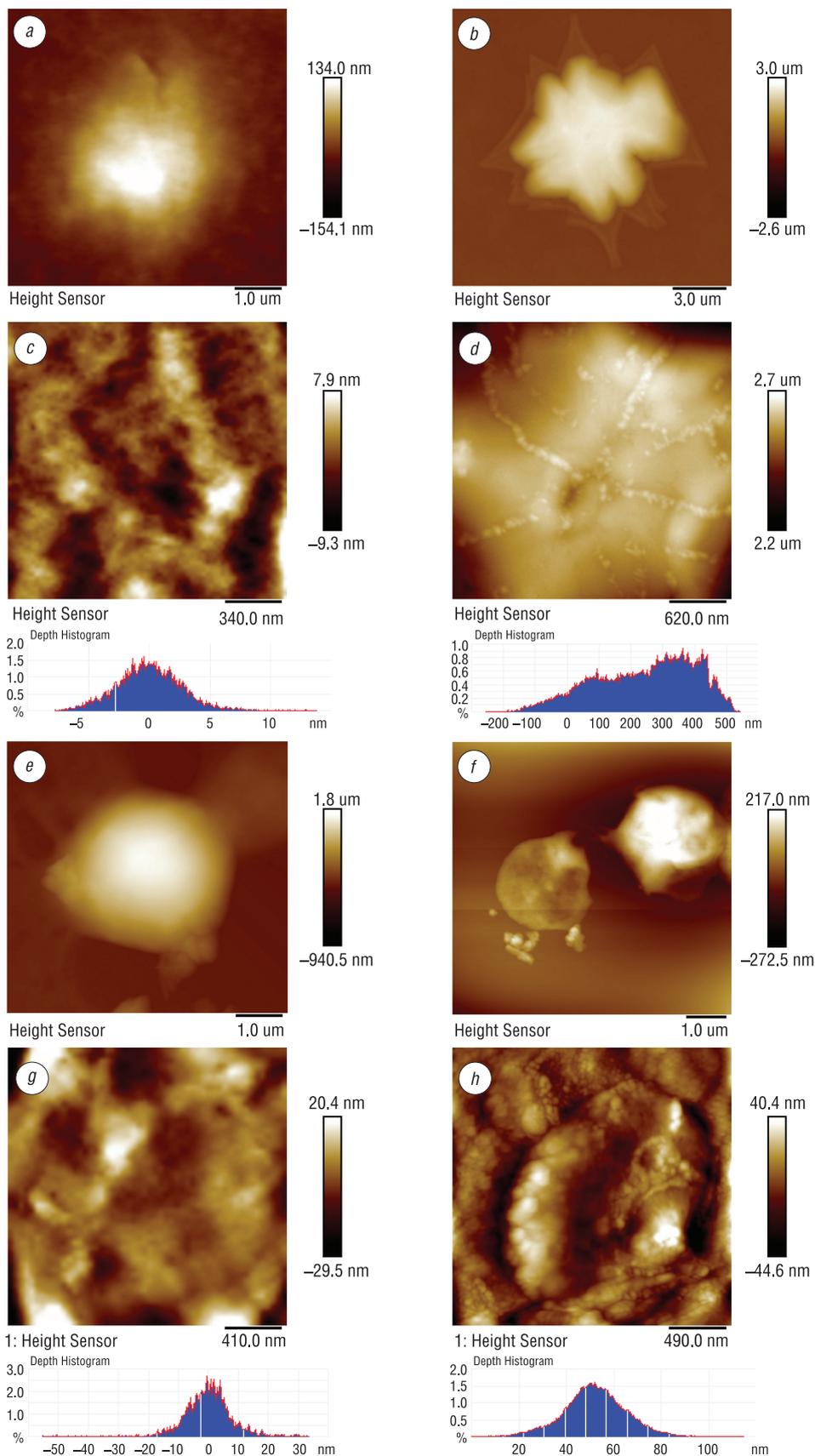


Рис. 4. Структура нефиксированных (a–d) и фиксированных (e–h) тромбоцитов до (a, c, e, g) и после (b, d, f, h) обработки плазмой барьерного разряда

Fig. 4. The structure of unfixed (a–d) and fixed (e–h) trombocytes before (a, c, e, g) and after (b, d, f, h) treatment of barrier discharge plasma

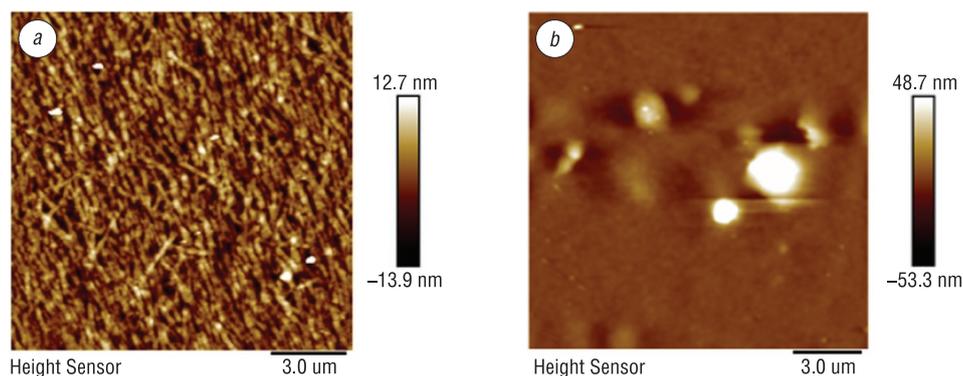


Рис. 5. Структуры плазмы крови до (а) и после (б) воздействия плазмы барьерного разряда

Fig. 5. Plasma structures before (a) and after (b) exposure to barrier discharge plasma

Заключение. В результате проведения исследований изучено взаимодействие низкотемпературной плазмы с мембраной биологических клеток, а именно эритроцитов и тромбоцитов. Установлено, что воздействие плазмой на клетки в течение 1 мин приводит к выходу белка и клеточного материала на поверхность мембраны клеток, изменению структуры самой мембраны, формы самой клетки и увеличению шероховатости поверхности.

Анализ проведенных АСМ-исследований показал изменение структуры мембран нефиксированных эритроцитов на фоне сохранения формы клетками крови. На поверхности клеток установлено наличие частиц субмикронного размера, что может быть объяснено как выходом содержимого клетки, так и разрушающим воздействием плазмы на белки наружного слоя мембраны. На основании полученных изменений значений сил адгезии, которые существенно возрастают у нефиксированных эритроцитов и немного снижаются у тромбоцитов, можно предположить возможное протекание перекисного окисления липидов в процессе оказываемого воздействия на клетки.

Установлено, что эритроциты являются более устойчивыми к кратковременному воздействию ПБР (1 мин) по сравнению с тромбоцитами.

Проведенные исследования показывают перспективность применения «холодной» плазмы при лечении гнойно-воспалительных заболеваний различной этиологии и локализации, а также в отоларингологии при лечении ринитов, отитов и др.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках проекта Ф17-118, осуществляемого совместно с Белорусским государственным университетом информатики и радиоэлектроники.

Acknowledgements

The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Project F17-118) together with the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Список использованных источников

1. Bactericidal effects of non-thermal argon plasma *in vitro*, in biofilms and in the animal model of infected wounds / S. A. Ermolaeva [et al.] // J. Med. Microbiol. – 2011. – Vol. 60, iss. 1. – P. 75–83. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.020263-0>
2. Laroussi, M. Low temperature plasma-based sterilization: overview and state-of-the-art / M. Laroussi // Plasma Process Polym. – 2005. – Vol. 2, iss. 5. – P. 391–400. <https://doi.org/10.1002/ppap.200400078>
3. Laroussi, M. Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma / M. Laroussi // IEEE Trans. Plasma Sci. – 1996. – Vol. 24, iss. 3. – P. 1188–1191. <https://doi.org/10.1109/27.533129>
4. Влияние ультрафиолетового излучения и излучения плазмы импульсного искрового разряда на зародышевые структуры и мицелий микромицетов-деструкторов / А. А. Ичеткина [и др.] // Вестн. Нижегород. ун-та им. Н. И. Лобачевского. – 2011. – Т. 2, № 2. – С. 196–201.
5. Исследование механизмов биоцидного действия излучения плазмы искрового разряда / И. П. Иванова [и др.] // Современные технологии в медицине. – 2012. – № 3. – С. 12–18.
6. Kunhardt, E. E. Generation of large volume atmospheric pressure non-equilibrium plasmas / E. E. Kunhardt // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2000. – Vol. 28, № 1. – P. 189–200. <https://doi.org/10.1109/27.842901>
7. Kogelschatz, U. Filamentary, patterned, and diffuse barrier discharges / U. Kogelschatz // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2002. – Vol. 30, № 4. – P. 1400–1408. <https://doi.org/10.1109/TPS.2002.804201>

8. Fridman, G. Medical applications of floating electrode dielectric barrier discharge (FE-DBD) / G. Fridman // First International Conference on Plasma Medicine (ICPM-1). Corpus Christi. – Texas, 2007. – P. 27–32.
9. Трофимова, С. В. Анализ структурных изменений прокариотических и эукариотических клеток под воздействием излучения плазмы искрового разряда / С. В. Трофимова, И. П. Иванова, М. Л. Бугрова // *Фундамент. исслед.* – 2013. – №4–1. – С. 130–133.
10. Окислительный стресс. Прооксиданты и антиоксиданты / Е. Б. Меньщикова [и др.]. – М.: Слово, 2006. – 556 с.
11. Atomic force microscopy probing of cell elasticity / T. G. Kuznetsova [et al.] // *Micron.* – 2007. – Vol. 38, №8. – P. 824–833. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2007.06.011>
12. Influence of polyacrylic acid nanoparticles on the elastic properties of RBCs membranes in patients with diabetes mellitus type 2 / G. B. Melnikova [et al.] // *Series on Biomechanics.* – 2015. – Vol. 29, №4. – P. 12–19.
13. The changes in particle distribution over the polymer surface under the dielectric barrier discharge plasma / V. A. Lapitskaya [et al.] // *Int. J. Nanosci.* – 2019. – Vol. 18, Nos. 3, 4. – P. 1940079. <https://doi.org/10.1142/s0219581x19400799>
14. Investigation of the structure of nanocrystalline refractory oxides by X-ray diffraction, electron microscopy, and atomic force microscopy / T. M. Ulyanova [et al.] // *Crystallogr. Rep.* – 2006. – Vol. 51. – S144–S149. <https://doi.org/10.1134/s1063774506070212>
15. Влияние обработки поверхностей материалов в плазме диэлектрического барьерного разряда на их морфологию и гидрофильные свойства / В. А. Лапицкая [и др.] // *Инж.-физ. журн.* – 2019. – Т. 92, №5. – С. 2389–2394. <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02050-1>
16. Возможности применения холодной атмосферной плазмы в онкологии (Обзор литературы) / В. Н. Короткий // *Сибир. онкол. журн.* – 2018. – Т. 17, №1. – С. 72–81. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2018-17-1-72-81>

References

1. Ermolaeva S. A., Varfolomeev A. F., Chernukha M. Yu., Yurov D. S., Vasiliev M. M., Kaminskaya A. A., Moisenovich M. M., Romanova J. M., Murashev A. N., Selezneva I. I., Shimizu T., Sysolyatina E. V., Shaginyan I. A., Petrov O. F., Mayevsky E. I., Fortov V. E., Morfill G. E., Naroditsky B. S., Gintsburg A. L. Bactericidal effects of non-thermal argon plasma *in vitro*, in biofilms and in the animal model of infected wounds. *Journal of Medical Microbiology*, 2011, vol. 60, iss. 1, pp. 75–83. <https://doi.org/10.1099/jmm.0.020263-0>
2. Laroussi M. Low temperature plasma-based sterilization: overview and state-of-the-art. *Plasma Processes and Polymers*, 2005, vol. 2, iss. 5, pp. 391–400. <https://doi.org/10.1002/ppap.200400078>
3. Laroussi M. Sterilization of contaminated matter with an atmospheric pressure plasma. *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, 1996, vol. 24, iss. 3, pp. 1188–1191. <https://doi.org/10.1109/27.533129>
4. Ichetkina A. A., Trofimova S. V., Kryazhev D. V., Ivanova I. P., Smirnov V. F. The effect of ultraviolet radiation and pulse spark discharge plasma radiation on embryonal structures and mycelium of micromycetes-destroyers. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo = Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 196–201 (in Russian).
5. Ivanova I. P., Trofimova S. V., Piskaryov I. M., Burkhina O. E., Sysoeva V. A., Karpel Vel Leitner N. The study of biocidal mechanisms of spark discharge plasma radiation. *Sovremennye tekhnologii v meditsine = Modern Technologies in Medicine*, 2012, no. 3, pp. 12–18 (in Russian).
6. Kunhardt E. E. Generation of large volume atmospheric pressure non-equilibrium plasmas. *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, 2000, vol. 28, no. 1, pp. 189–200. <https://doi.org/10.1109/27.842901>
7. Kogelschatz U. Filamentary, patterned, and diffuse barrier discharges. *IEEE Transactions on Plasma Sciences*, 2002, vol. 30, no. 4, pp. 1400–1408. <https://doi.org/10.1109/TPS.2002.804201>
8. Fridman G. Medical applications of floating electrode dielectric barrier discharge (FE-DBD). *First International Conference on Plasma Medicine (ICPM-1). Corpus Christi. Texas*, 2007, pp. 27–32.
9. Trofimova S. V., Ivanova I. P., Bugrova M. L. The analysis of structural changes of prokaryotic and eukaryotic cell under the influence of plasma spark radiation. *Fundamental'nye issledovaniya = Fundamental Research*, 2013, vol. 4–1, pp. 130–133 (in Russian).
10. Men'shchikova E. B., Lankin V. Z., Zenkov N. K., Bondar' I. A., Krugovykh N. F., Trufakin V. A. *Oxidative Stress. Prooxidants and Antioxidants*. Moscow, Slovo Publ., 2006. 556 p. (in Russian).
11. Kuznetsova T. G., Starodubtseva M. N., Yegorenkov N. I., Chizhik S. A., Zhdanov R. I. Atomic force microscopy probing of cell elasticity. *Micron*, 2007, vol. 38, no. 8, pp. 824–833. <https://doi.org/10.1016/j.micron.2007.06.011>
12. Melnikova G. B., Kuzhel N. S., Tolstaya T. N., Konstantinova E. E., Drozd E. S., Shyshko O. N., Mokhort T. V., Antonova N., Kowalczyk A., Koseva N. Influence of polyacrylic acid nanoparticles on the elastic properties of RBCs membranes in patients with diabetes mellitus type 2. *Series on Biomechanics*, 2015, vol. 29, no. 4, pp. 12–19.
13. Lapitskaya V. A., Kuznetsova T. A., Melnikova G. B., Chizhik S. A., Kotov D. A. The changes in particle distribution over the polymer surface under the dielectric barrier discharge plasma. *International Journal of Nanoscience*, 2019, vol. 18, nos. 3, 4, pp. 1940079. <https://doi.org/10.1142/s0219581x19400799>
14. Ulyanova T. M., Titova L. V., Medichenko S. V., Zonov Yu. G., Konstantinova T. E., Glazunova V. A., Doroshkevich A. S., Kuznetsova T. A. Investigation of the structure of nanocrystalline refractory oxides by X-ray diffraction, electron microscopy, and atomic force microscopy. *Crystallography Reports*, 2006, vol. 51, S144–S149. <https://doi.org/10.1134/s1063774506070212>
15. Lapitskaya V. A., Kuznetsova T. A., Rogachev A. A., Melnikova G. B., Chizhik S. A., Kotov D. A. Influence of processing in a plasma of dielectric barrier discharge on morphology and hydrophilic properties of surfaces of glass, metal and polymers. *Journal of Engineering Physics*, 2019, vol. 92, no. 5, pp. 1349–1354 (in Russian). <https://doi.org/10.1007/s10891-019-02050-1>
16. Korotky V. N. Feasibility of using cold atmospheric plasma in the treatment of cancer patients (literature review). *Siberian Journal of Oncology*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 72–81. <https://doi.org/10.21294/1814-4861-2018-17-1-72-81>

Информация об авторах

Мельникова Галина Борисовна – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: galachkax@gmail.com

Латицкая Василина Александровна – научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vasilinka.92@mail.ru

Кузнецова Татьяна Анатольевна – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего лабораторией нанопроцессов и технологий, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kuzn06@mail.ru

Толстая Татьяна Николаевна – научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tolstaya.tn@yandex.ru

Чижик Сергей Антонович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, первый заместитель Председателя Президиума Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости, 66, 220072, Минск, Республика Беларусь); главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: chizhik_sa@tut.by

Котов Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, руководитель НИР, директор Центра 4.13, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 66, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kotov@bsuir.by

Information about the authors

Galina B. Melnikova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Senior 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: galachkax@gmail.com

Vasilina A. Lapitskaya – 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: vasilinka.92@mail.ru

Tatyana A. Kuznetsova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Senior 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: kuzn06@mail.ru

Tatyana N. Tolstaya – 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: tolstaya.tn@yandex.ru

Sergei A. Chizhik – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, First Deputy Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Chief 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: chizhik_sa@tut.by

Dmitrii A. Kotov – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Director of Center “Engineering and Educational center “Isovac-BSUIR”, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (66, P. Brovka Str., 220013, Republic of Belarus). E-mail: kotov@bsuir.by

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.313

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-83-96>

Поступила в редакцию 08.01.2020

Received 08.01.2020

А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Беларусь***ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ «СВОБОДНОПОРШНЕВОЙ
ДВИГАТЕЛЬ – ЭЛЕКТРОМЕХАНОТРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ НА БАЗЕ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА ВОЗВРАТНО-ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ»**

Аннотация. В ходе анализа состояния и перспектив развития автономных источников электрической энергии с электрическими генераторами возвратно-поступательного движения установлено, что в настоящее время широко распространены маломощные системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения». Проведенные исследования электрических генераторов возвратно-поступательного движения показали, что особого внимания заслуживают комбинированные генераторы, которые способны повысить эффективность такой системы. Однако до настоящего времени изучению системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения» не уделялось должного внимания. В связи с этим была разработана имитационная модель системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения», позволяющая проводить исследования данной системы в различных режимах работы при изменении параметров электрической и механической подсистем. Отличительной особенностью разработанной имитационной модели является учет особенностей одновременного использования в магнитной системе электрического генератора возвратно-поступательного движения поперечного и продольного нелинейного изменения магнитных потоков. В результате проведенных исследований имитационной модели показано, что комбинированный электрический генератор возвратно-поступательного движения позволяет обеспечить непрерывное преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию на всем рабочем цикле, а также скомпенсировать рассогласование сил электрической и механической подсистем системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения».

Ключевые слова: электромеханический преобразователь энергии возвратно-поступательного движения, электромеханотронный преобразователь, имитационная модель, электрический генератор возвратно-поступательного движения, свободнопоршневой двигатель

Для цитирования: Менжинский, А. Б. Имитационная модель «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения» / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 83–96. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-83-96>

Andrei B. Menzhinsky, Andrey N. Malashin*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Belarus***SIMULATION MODEL “FREE-PISTON ENGINE – ELECTROMECHANOTRONIC CONVERTER ON THE BASIS
OF AN ELECTRICAL GENERATOR RECIPROCATING”**

Abstract. The analysis of the state and prospects of development of autonomous electric power sources with electric reciprocating motion generators has shown that at present, low-power systems “free-piston engine – electromechatron converter based on an electric reciprocating motion generator” are widely used. Studies of electric reciprocating generators have shown that special attention should be paid to combined generators that can improve the efficiency of such a system. However, until now, the study of the system “free-piston engine – electromechatron converter based on a combined electric reciprocating generator” has not been given due attention. In this regard, a simulation model of the system “free-piston engine – electromechatron converter based on an electric generator of reciprocating motion” was developed, which allows conducting research of this system in various operating modes when changing the parameters of the electrical and mechanical subsystems. A distinctive feature of the developed simulation model is the consideration of the features of simultaneous use in the magnetic system of an electric generator of reciprocating motion of transverse and longitudinal nonlinear changes in magnetic flows. As a result of the simulation model studies, it is shown that the combined electric generator of reciprocating motion allows for continuous conversion of mechanical energy of reciprocating motion into electricity over the entire operating cycle, as well as – to compensate for the mismatch of the forces of the electrical and mechanical subsystems of the system “free-piston engine – electromechatron converter based on an electric generator of reciprocating motion”.

Keywords: electromechanical converter of reciprocating motion energy, electromechatron converter, simulation model, electric generator of reciprocating motion, free-piston engine

For citation: Menzhinsky A. B., Malashin A. N. Simulation model “free-piston engine – electromechatronic converter on the basis of an electrical generator reciprocating”. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 83–96 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-83-96>

Введение. Большинство маломощных автономных источников электрической энергии (АИЭЭ) входящих в состав автономной системы электроснабжения (АСЭС), строятся по традиционной схеме на базе двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с кривошипно-шатунным механизмом (КШМ) и электрической машины вращательного типа [1, 2]. Основными недостатками такого типа АИЭЭ являются: относительно большие массогабаритные показатели; низкие удельные показатели; высокий уровень шума; затруднительный пуск при отрицательных температурах; непустимость работы с нагрузкой менее 20–40 %; высокий удельный расход топлива; сравнительно малый ресурс работы; относительно невысокий коэффициент полезного действия (КПД) [1].

Кроме того, на процесс создания новых видов АИЭЭ в последнее время все большее влияние оказывает складывающаяся в мире экологическая обстановка, которая заставляет ученых искать пути повышения экономичности и экологической чистоты механического привода АИЭЭ как одного из основных загрязнителей атмосферы.

В связи с этим в промышленно развитых странах (Россия, США, Великобритания, Япония, Германия, Швеция, Нидерланды, Китай, Израиль и др.) в качестве перспективного АИЭЭ рассматривается система «свободнопоршневой двигатель (СПД) – электромеханотронный преобразователь (ЭМП) [3] на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения (ЭГВПД)» [4–6].

В течение 5–10 лет в Республике Беларусь также необходимо осуществить переход с дизель-генераторных силовых установок вращательного действия на свободнопоршневые дизель-генераторные установки на альтернативных экологически чистых видах топлива [7]. Это, в свою очередь, требует развития теории электромеханики применительно к ЭМПЭ возвратно-поступательного движения, которые повысили бы эффективность системы «СПД – ЭМП на базе ЭГВПД».

Проведенные в [8] исследования разработанных авторами данной статьи структур ЭГВПД показали, что особого внимания заслуживают комбинированные ЭГВПД с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока, которые способны повысить эффективность системы «СПД – ЭМП на базе ЭГВПД». Однако до настоящего времени исследованию данной системы с комбинированным (поперечным и продольным) нелинейным изменением магнитного потока не уделялось должного внимания.

Таким образом, разработка имитационной модели (ИМ) системы «СПД – ЭМП на базе ЭГВПД» с целью ее исследования в различных режимах работы представляет особую актуальность.

Структура разработанного комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения. Вариант структуры разработанного авторами настоящей статьи комбинированного ЭГВПД представлен на рис. 1¹.

Комбинированный ЭГВПД содержит:

неподвижные С-образный магнитопровод 1 и Н-образный магнитопровод 2, набранные из листов электротехнической стали с общим стержнем 3, на котором размещена генераторная обмотка 4;

два подвижных П-образных магнитопровода 5, 6, набранных из листов электротехнической стали;

девять постоянных магнитов 7.1–7.4, 8.1, 8.2, 9.1–9.3;

два стержня 10.1, 10.2, изготовленных из листов электротехнической стали;

четыре изолирующих каркаса 11.1–11.4.

¹ Комбинированный генератор возвратно-поступательного типа: пат. 12237U Респ. Беларусь. МПК Н 02К 35/00 (2006.01)/ А. Б. Менжинский, Ю. В. Суходолов, А. Н. Малашин, А. Е. Каледа, П. Б. Менжинский ; дата публ.: 28.02.2020.

На изолирующих каркасах 11.1 и 11.2 закреплены два подвижных П-образных магнитопровода 5, 6 с постоянными магнитами 7.1–7.4 на каждом стержне 5.1, 5.2, 6.1, 6.2 соответственно, где постоянные магниты 7.1 и 7.3, 7.2 и 7.4 разделены воздушными зазорами между торцами стержней 5.1–2.1, 5.2–2.2, 6.1–2.3, 6.2–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 и двух подвижных П-образных магнитопроводов 5, 6 и обращены друг к другу разноименными полюсами, причем оси постоянных магнитов 7.1–7.4 совпадают с осями стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2. Два постоянных магнита 8.1, 8.2 с чередующейся полярностью расположены в воздушном зазоре между торцами стержней 1.1, 1.2 неподвижного С-образного магнитопровода 1. Оси постоянных магнитов 8.1, 8.2 параллельны осям стержней 1.1, 1.2 неподвижного С-образного магнитопровода 1. Кроме того, на изолирующих каркасах 11.1, 11.2 закреплены стержни 10.1 и 10.2, изготовленные из листов электротехнической стали. На торцах этих стержней расположены постоянные магниты 9.1 и 9.3, между которыми с помощью изолирующих каркасов 11.3 и 11.4, закрепленных на общем стержне 3 неподвижных С-образного магнитопровода 1 и Н-образного магнитопровода 2, размещен постоянный магнит 9.2, причем постоянные магниты 9.1–9.3 расположены таким образом, что их полярности чередуются, а оси совпадают и параллельны осям стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2. При этом величина воздушного зазора между постоянными магнитами 9.1, 9.2 и 9.2, 9.3 равна величине воздушного зазора между торцами стержней 5.1, 5.2, 6.1, 6.2 подвижных П-образных магнитопроводов 5, 6 с постоянными магнитами 7.1–7.4 и торцами стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 соответственно.

Комбинированный ЭГВПД собран таким образом, что площадь сечения общего стержня 3 неподвижных С-образного магнитопровода 1 и Н-образного магнитопровода 2 равна суммарной площади сечений стержней 1.1, 2.1 неподвижного С-образного магнитопровода 1 и неподвижного Н-образного магнитопровода 2 соответственно. Возвратно-поступательное движение подвижные П-образные магнитопроводы 5 и 6 совершают в одной плоскости, вдоль осей стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2.

Одной из особенностей разработанной структуры комбинированного ЭГВПД является то, что она позволяет скомпенсировать силы магнитного притяжения, действующие между постоянными магнитами 7.1–7.4 и стержнями 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 соответственно.

Принцип работы комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения. Постоянные магнитные потоки от постоянных магнитов 7.1–7.4 и 8.1, 8.2 замыкаются по магнитным цепям: «постоянный магнит 7.1 – воздушный зазор – стержень 2.1 – общий стержень 3 – стержень 2.2 – воздушный зазор – постоянный магнит 7.2 – стержень 5.2 – подвижный П-образный магнитопровод 5 – стержень 5.1 – постоянный магнит 7.1»; «постоянный

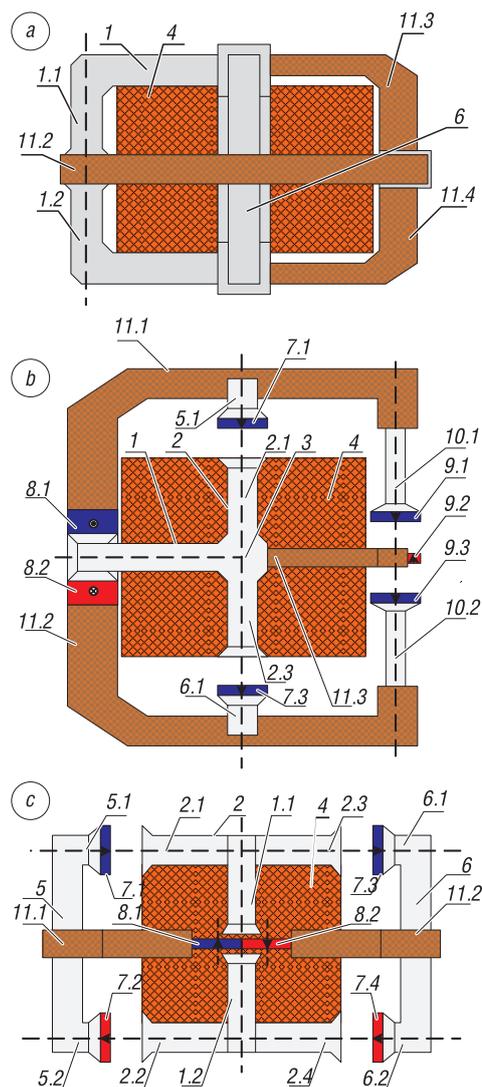


Рис. 1. Структура комбинированного электрического генератора возвратно-поступательного движения: а – вид в плоскости Oyz ; б – вид в плоскости Oxy ; с – вид в плоскости Oxz

Fig. 1. The combined structure of electrical generator reciprocating: а – form in the plane Oyz ; б – form in the plane Oxy ; с – form in the plane Oxz

магнит 7.4 – воздушный зазор – стержень 2.4 – общий стержень 3 – стержень 2.3 – воздушный зазор – постоянный магнит 7.3 – стержень 6.1 – подвижный П-образный магнитопровод 6 – стержень 6.2 – постоянный магнит 7.4» и «постоянный магнит 8.1 (8.2) – воздушный зазор – стержень 1.1 (1.2) – общий стержень 3 – стержень 1.2 (1.1) – воздушный зазор – постоянный магнит 8.1 (8.2)», – соответственно и суммируются в общем стержне 3.

При совершении подвижными П-образными магнитопроводами 5 и 6 возвратно-поступательного движения вдоль осей стержней 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 происходит изменение величины воздушных зазоров между торцами стержней 5.1–2.1, 5.2–2.2, 6.1–2.3, 6.2–2.4, а также площади сечения воздушного зазора между торцами стержней 1.1, 1.2 и постоянными магнитами 8.1, 8.2. Это вызывает изменение магнитных проводимостей следующих магнитных цепей: «постоянный магнит 7.1 – воздушный зазор – стержень 2.1 – общий стержень 3 – стержень 2.2 – воздушный зазор – постоянный магнит 7.2 – стержень 5.2 – подвижный П-образный магнитопровод 5 – стержень 5.1 – постоянный магнит 7.1»; «постоянный магнит 7.4 – воздушный зазор – стержень 2.4 – общий стержень 3 – стержень 2.3 – воздушный зазор – постоянный магнит 7.3 – стержень 6.1 – подвижный П-образный магнитопровод 6 – стержень 6.2 – постоянный магнит 7.4» и «постоянный магнит 8.1 (8.2) – воздушный зазор – стержень 1.1 (1.2) – общий стержень 3 – стержень 1.2 (1.1) – воздушный зазор – постоянный магнит 8.1 (8.2)». В то же время постоянные магниты 9.1–9.3 компенсируют силы магнитного притяжения, действующие между постоянными магнитами 7.1–7.4 и стержнями 2.1–2.4 неподвижного Н-образного магнитопровода 2 соответственно.

Изменение магнитных проводимостей магнитных цепей вызывает продольное и поперечное изменения во времени постоянных магнитных потоков от постоянных магнитов 7.1–7.4 и 8.1, 8.2, замыкающихся по этим магнитным цепям. За счет того что продольно и поперечно изменяющиеся во времени постоянные магнитные потоки от указанных постоянных магнитов суммируются в общем стержне 3 неподвижных С-образного магнитопровода 1 и Н-образного магнитопровода 2, в общем стержне 3 формируется комбинированный магнитный поток. Изменяющийся во времени комбинированный магнитный поток, согласно закону Фарадея, наводит в генераторной обмотке 4 электродвижущую силу. При подключении нагрузки комбинированный ЭГВПД формирует равномерно действующую (распределенную на всем рабочем ходе более равномерно) электромагнитную силу (ЭМС) на подвижную часть генератора не только на середине рабочего хода, но и вблизи крайних точек рабочего хода комбинированного ЭГВПД.

Разработка имитационной модели системы «свободнопоршневой двигатель – электро-механотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения». При разработке ИМ были рассмотрены два режима работы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД». Первый режим работы – аварийный «Авария» (например, пропуск зажигания рабочей смеси и т. д.), в котором в крайних положениях поршневой группы не выполняются условия баланса сил механической (приводной двигатель) и электрической (ЭМТП на базе ЭГВПД) подсистем системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» и может произойти поломка [9]. Второй режим работы – основной «Работа» [10, 11], в котором выполняется условие баланса сил механической и электрической подсистем на всем рабочем цикле.

В режиме «Авария» система управления электрической подсистемы должна компенсировать силы электрической и механической подсистем в крайнем положении поршневой группы [9] и тем самым предотвращать поломку системы. В режиме «Работа» система управления электрической подсистемы должна выполнять следующие задачи [11]: эффективное преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию на всем рабочем цикле; поддержание стабильного режима работы системы (выполнение условия баланса (согласования) сил механической и электрической подсистем); обеспечение заданного движения поршня для реализации требуемой степени сжатия; поддержание заданной средней скорости поршневой группы.

Вопрос компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в крайних положениях поршневой группы в режиме «Авария» за счет управления ЭМС электрической подсистемы уже раскрыт в [12]. Поэтому целью настоящего исследования явилась разработка ИМ системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» при компенсации рассогласования сил электриче-

ской и механической подсистем в режиме «Работа» за счет управления ЭМС ЭГВПД с комбинированным нелинейным изменением магнитного потока. Проведенные теоретические исследования показали, что управление ЭМС ЭГВПД с комбинированным нелинейным изменением магнитного потока возможно реализовать при работе генератора с управляемым преобразователем (УП) на базе повышающего импульсного регулятора напряжения (ПИРН) [13].

С учетом задач систем управления в режимах «Авария» и «Работа» авторами разработана функциональная схема системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» (рис. 2).

Схема включает: СПД – свободнопоршневой двигатель; КГ (комбинированный генератор) – комбинированный ЭГВПД; БФЭМС – блок формирования ЭМС; БСС – блок сравнения сил механической и электрической подсистем; БККУН – блок коммутации контура управления напряжением; БФУВ – блок формирования управляющего воздействия, подробно рассмотрен в [12]; УП (НР) – управляемый преобразователь в режиме «Работа»; УП (АР) – управляемый преобразователь в режиме «Авария»; БКУП – блок коммутации УП; АКБ – аккумуляторные батареи; $x_{п.г}$ – координата перемещения поршневой группы СПД; F^* – электромагнитная сила КГ; F_d – движущая сила СПД; $F_{ЭМС.э}$ – заданное значение ЭМС от электрической подсистемы; $F_{ЭМС.м}$ – заданное значение ЭМС от механической подсистемы; f – функция, характеризующая рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа»; β – сигнал отключения (подключения) контура управления напряжением; λ – функция, характеризующая рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Авария»; δ – сигнал об аварийном режиме работы СПД; u – напряжение на зажимах рабочей обмотки КГ; i – ток в рабочей обмотке КГ.

Блоки БСС, БККУН, УП (НР) функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» задействованы только в режиме «Работа», блоки БФУВ, УП (АР), АКБ функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» – только в режиме «Авария» [12], блоки СПД, КГ, БФЭМС, БКУП функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» – в обоих режимах работы.

На основании функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» (см. рис. 2) разработана имитационная модель данной системы (рис. 3), которая включает в себя имитационные модели механической (СПД) и электрической подсистем.

Имитационная модель механической подсистемы представлена на рис. 4.

Имитационная модель электрической подсистемы включает в себя имитационные модели отдельных блоков электрической подсистемы (ЭМТП на базе ЭГВПД). Авторами разработаны ИМ блоков электрической подсистемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД», которые позволяют

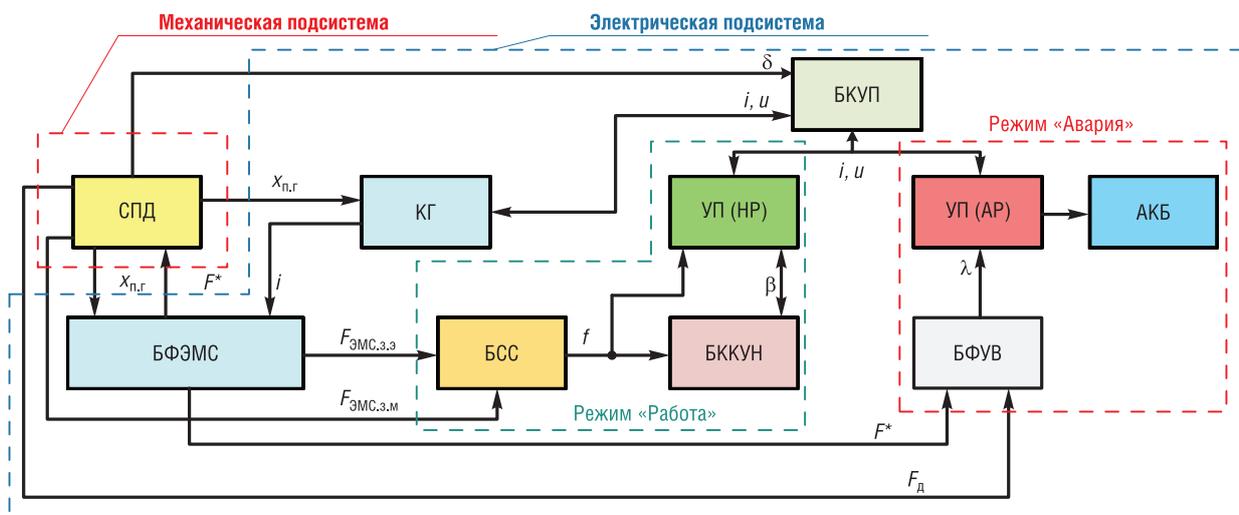


Рис. 2. Функциональная схема системы «свободнопоршневой двигатель – электромехатронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения»

Fig. 2. Functional diagram of the system of “free-piston engine – electromechatronic converter on the basis of an electrical generator reciprocating”

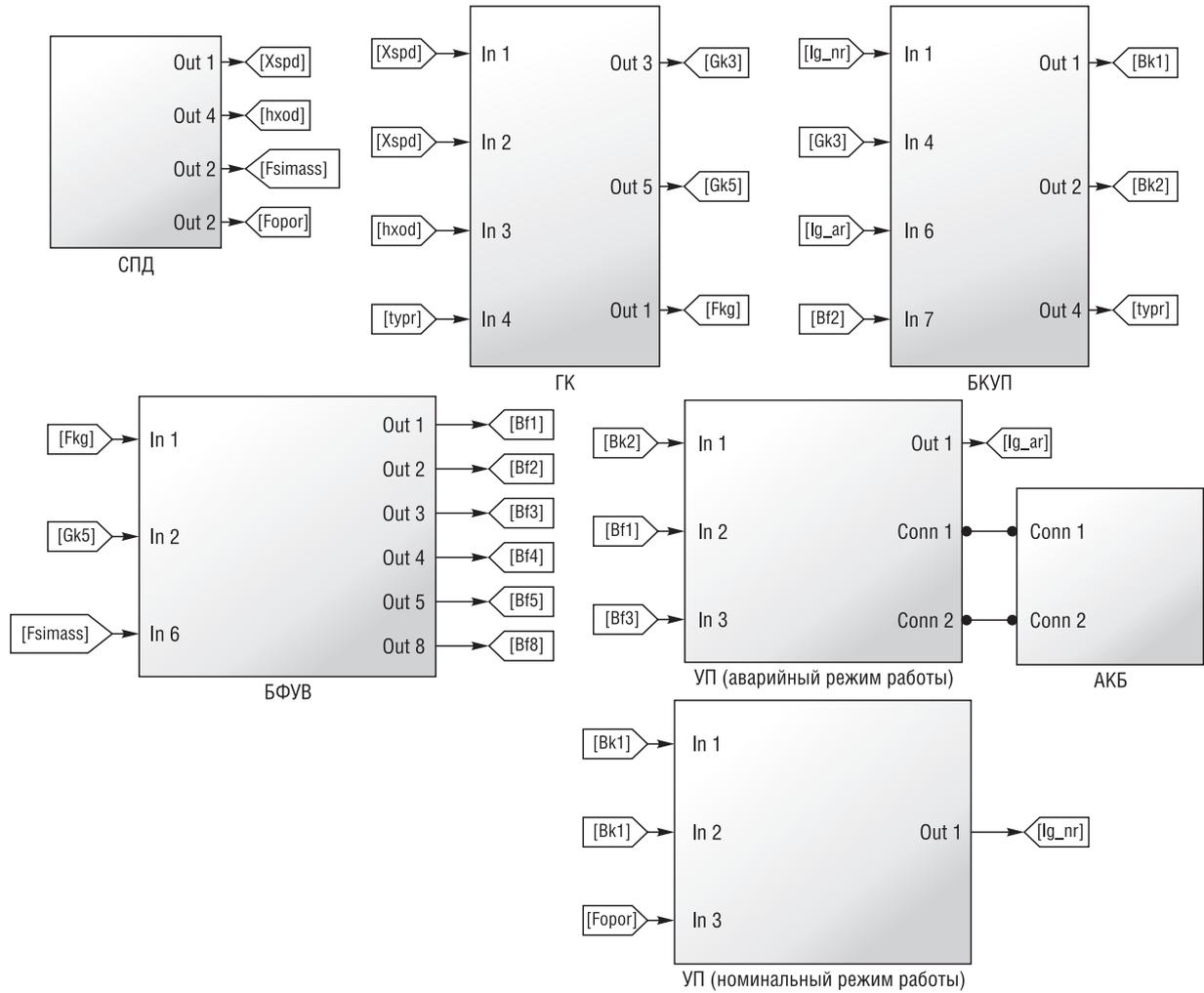


Рис 3. Имитационная модель системы «свободнопоршневой двигатель – электромехатронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения»

Fig. 3. Simulation model of the system “free-piston engine – electromechatronic converter on the basis of an electrical generator reciprocating”

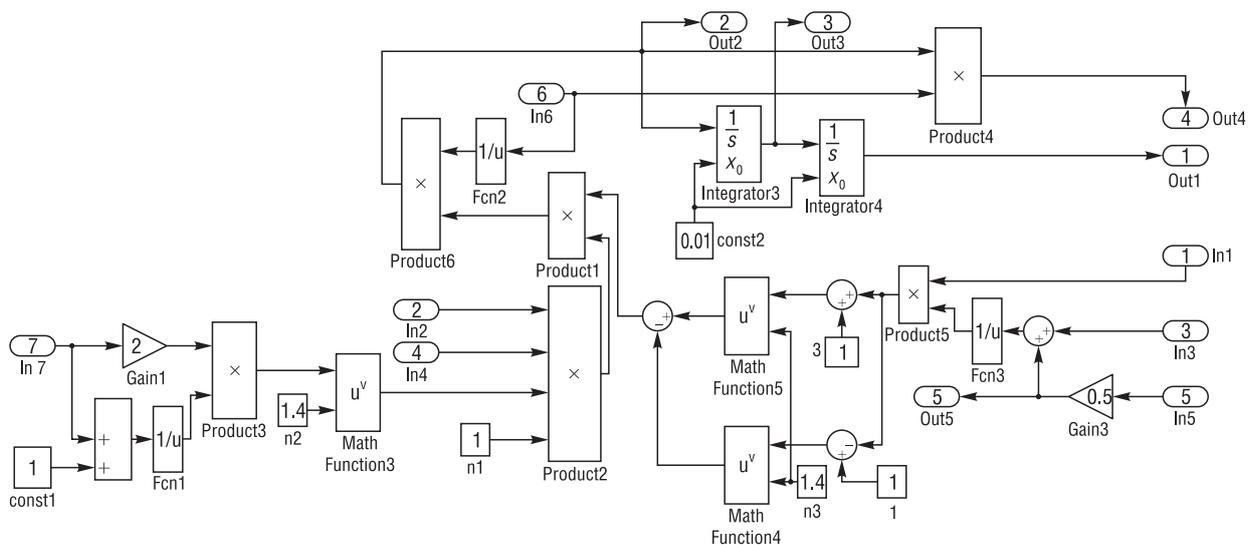


Рис. 4. Имитационная модель механической подсистемы

Fig. 4. Simulation model of the mechanical subsystem

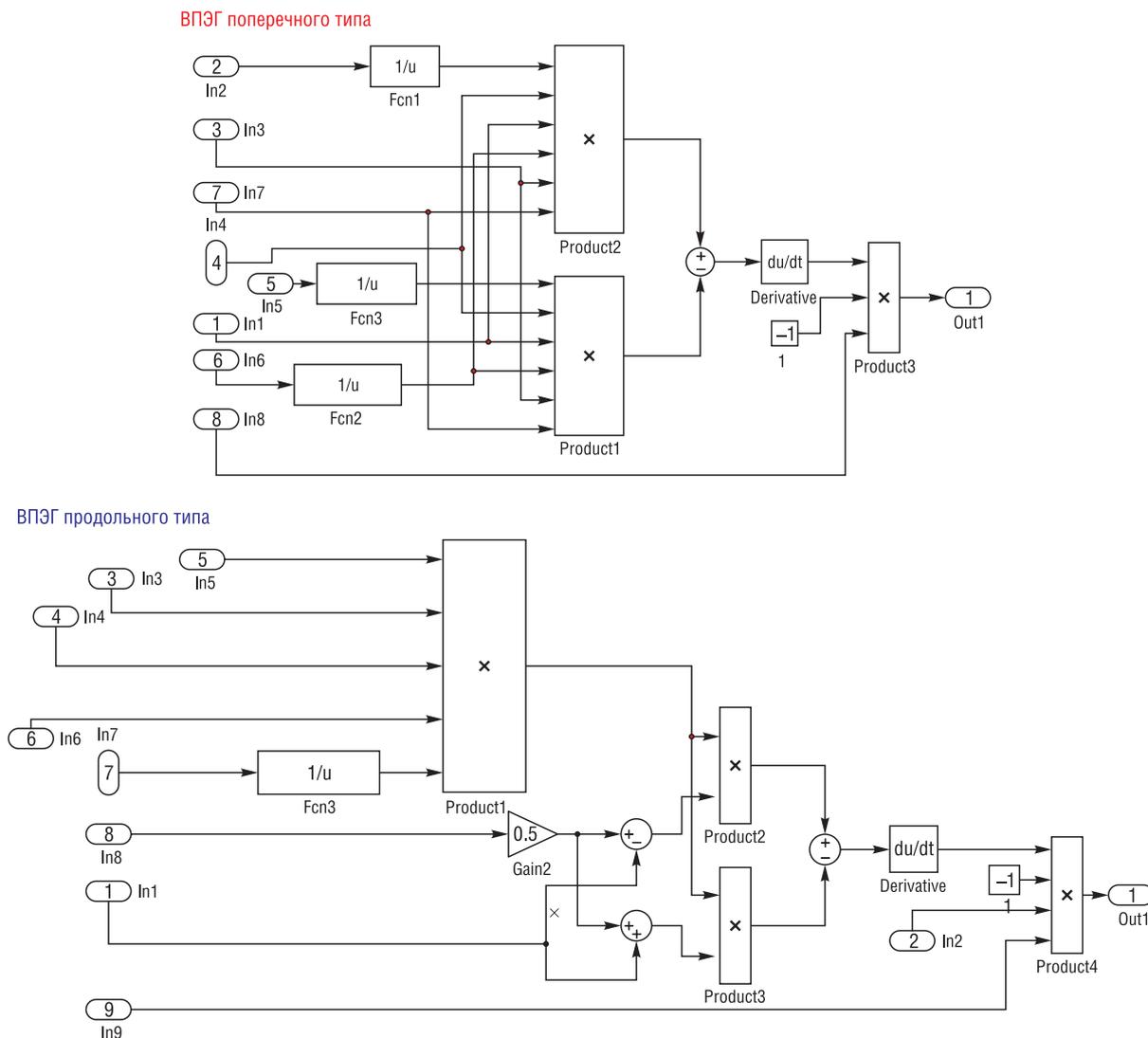


Рис. 5. Имитационная модель комбинированного генератора
 Fig. 5. Simulation model of the combined generator

реализовать режим «Работа». Имитационные модели блоков КГ, БФЭМС электрической подсистемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» представлены на рис. 5, 6.

На рис. 7 представлена разработанная авторами функциональная схема системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа».

Схема замещения УП на базе ПИРН в режиме «Работа» (рис. 8) описывается системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} L di_L / dt = u - Ri_L - K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u}) u_c; \\ C du_c / dt = K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u}) i_L - u_c / R_H, \end{cases} \quad (1)$$

где $K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u})$ – коммутационная функция в режиме «Работа»; $\xi_{i,u}$ – разностная функция в режиме «Работа»; L – индуктивность дросселя; i_L – ток дросселя; u – выпрямленное переменное напряжение генератора на выходе выпрямителя; R – активное сопротивление, характеризующее потери в преобразователе; u_c – напряжение на емкости; c – емкость; R_H – активное сопротивление нагрузки.

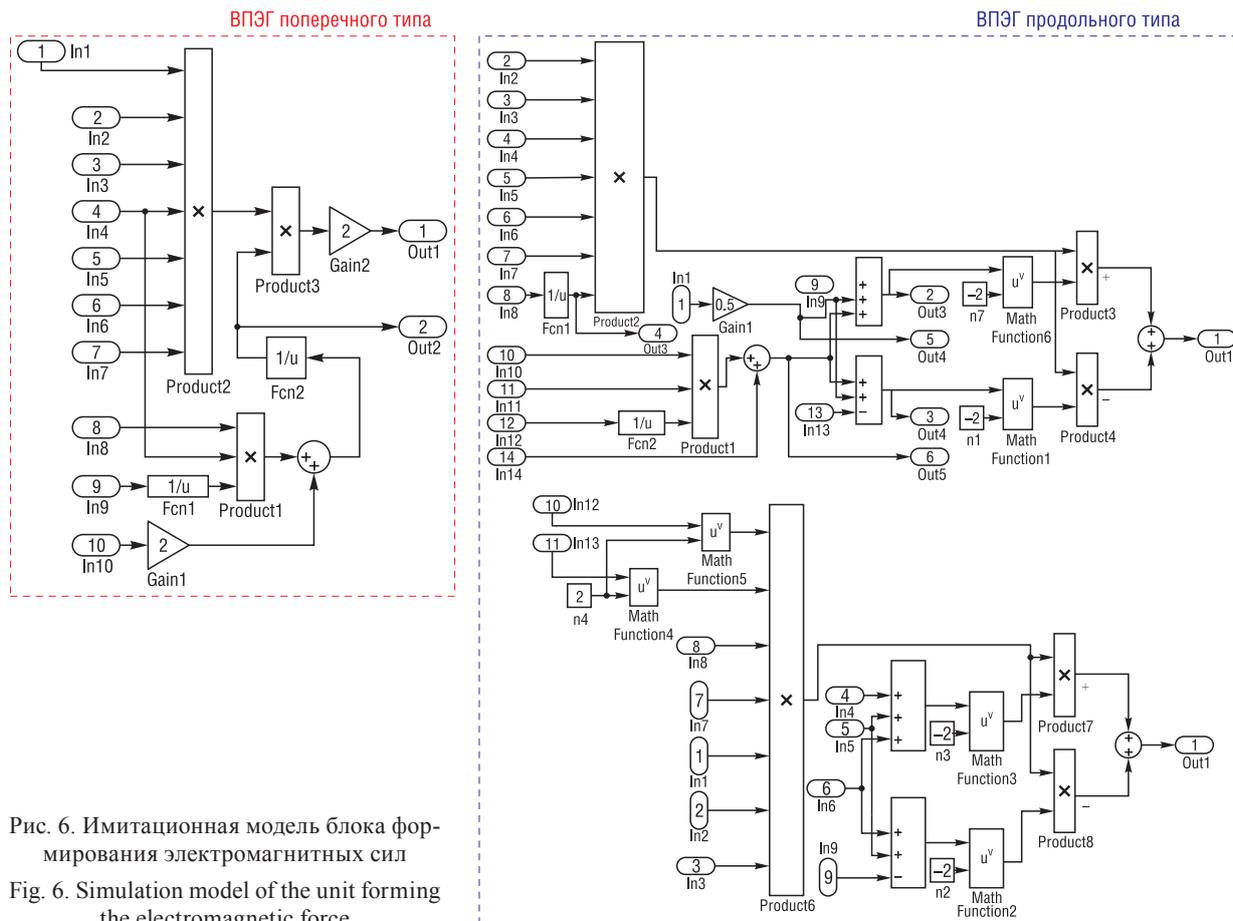


Рис. 6. Имитационная модель блока формирования электромагнитных сил
 Fig. 6. Simulation model of the unit forming the electromagnetic force

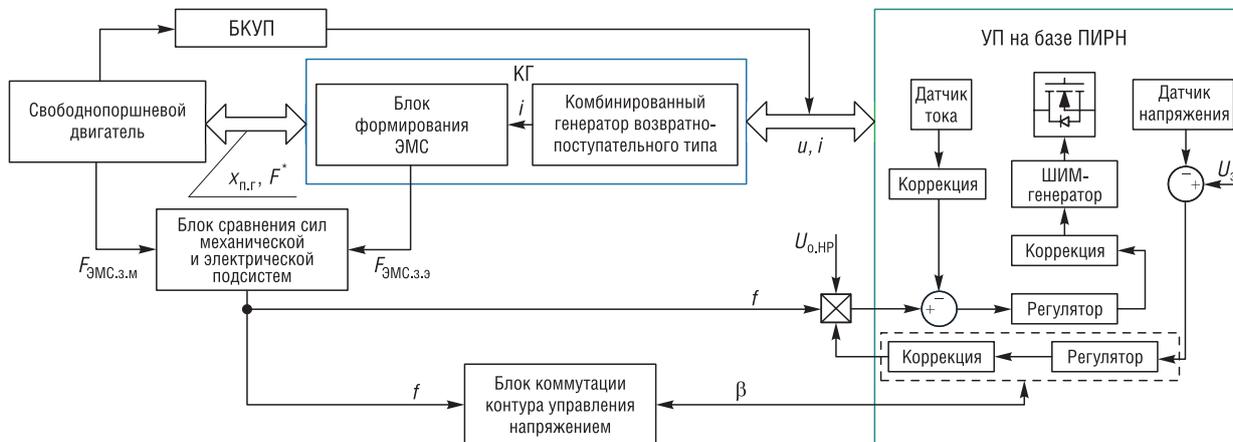


Рис. 7. Функциональная схема системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения» при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа»
 Fig. 7. Functional diagram of the system “free-piston engine – electromechatron converter based on an electric generator of reciprocating motion” for compensation of misalignment of forces of electrical and mechanical subsystems in the “Work mode”

Согласно схеме замещения разностная функция $\xi_{i,u}$ принимает вид

$$\xi_{i,u} = \begin{cases} \alpha_i (f U_{o,HP} |\alpha_u (U_3 - \beta_u U)|^2 - \beta_i i_L) & \text{при } \beta = 0, \text{ если } f \in [f_1; f_2]; \\ \alpha_i (f U_{o,HP} - \beta_i i_L) & \text{при } \beta = 1, \text{ если } f \notin [f_1; f_2], \end{cases} \quad (2)$$

где $U_{o,HP}$ – опорный сигнал в режиме «Работа»; α_u – коэффициент усиления ошибки по напряжению контура управления напряжением; U_3 – заданное напряжение; β_u – коэффициент передачи

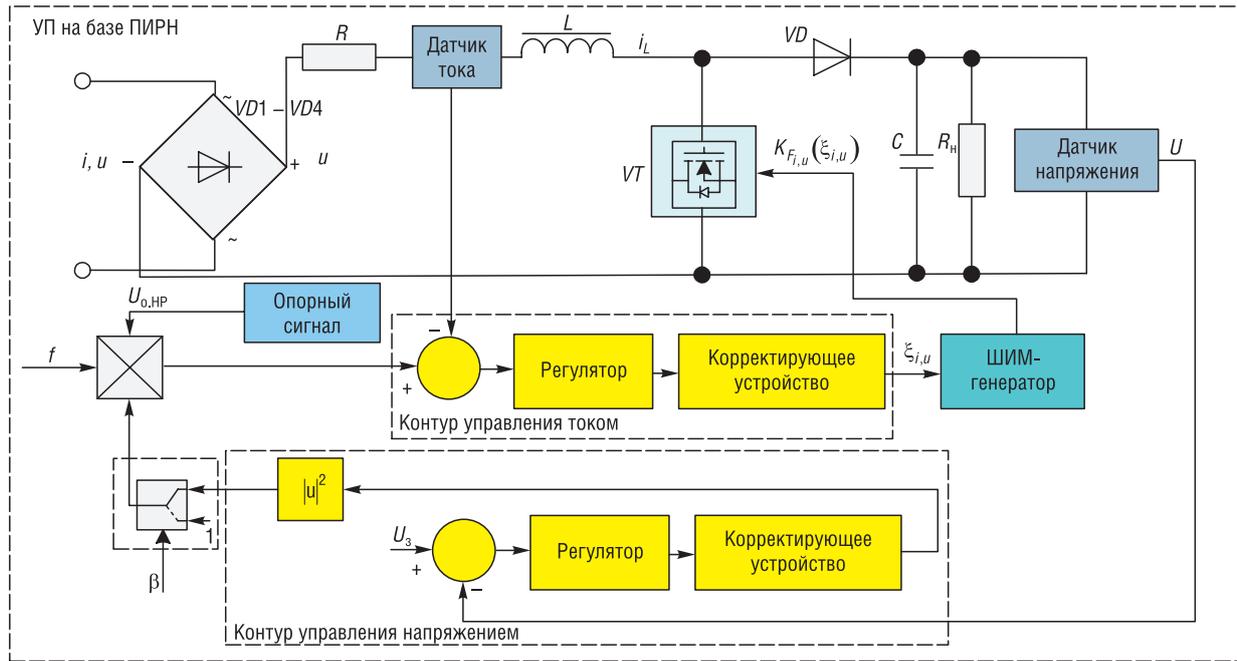


Рис. 8. Схема замещения управляемого преобразователя на базе повышающего импульсного регулятора напряжения в режиме «Работа»

Fig. 8. Replacement circuit of the controlled converter on the basis of an increasing pulse voltage regulator in the “Work mode”

датчика обратной связи выходного напряжения; f_1, f_2 – заданные значения функции f ; α_i – коэффициент усиления ошибки по току контура управления током; β_i – коэффициент передачи датчика обратной связи тока дросселя; U – напряжение на выходе датчика напряжения УП.

Коммутационная функция $K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u})$ характеризует состояния ключа VT на каждом периоде широтно-импульсной модуляции (ШИМ) и представляется выражением

$$K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u}) = \frac{1}{2}(1 + \text{sign}(\xi_{i,u})). \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что коммутационная функция принимает два значения – 0 и 1.

На основании функциональной схемы системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» (см. рис. 7) в среде MatLab/Simulink разработаны ИМ УП (НР) с номинальной мощностью $P_n = 1,1$ кВт и частотой коммутации ключа $f_s = 51,2$ кГц, а также БККУН, БСС механической и электрической подсистем (рис. 9). Анализ передаточных функции УП на базе ПИРН показал, что работа УП возможна при коррекции его динамических свойств. Стабилизация усиления на низких частотах обеспечивается применением в контуре управления интегрирующего звена, а коррекция средних и высоких частот достигается введением в контур управления дифференцирующего звена первого порядка и апериодического звена.

Блок-схема алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» в режиме «Работа» представлена на рис. 10.

Пояснение алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» в режиме «Работа». В режиме «Работа» сигнал $\delta = 0$ с выхода СПД поступает на вход БКУП, который подключает УП (НР) к выходу КГ. В БСС механической и электрической подсистем рассчитывается значение функции f , характеризующей рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа», на основании заданных значений ЭМС $F_{ЭМС.э}$ и $F_{ЭМС.м}$ от электрической и механической подсистем. Далее в БККУН осуществляется определение принадлежности f заданному интервалу $[f_1, f_2]$. Если $f \in [f_1, f_2]$, то формируется сигнал $\beta = 0$, иначе формируется сигнал $\beta = 1$. Затем с учетом $f, \beta, U_{o,HP}$ в УП (НР) формирует разностная функция $\xi_{i,u}$ которая определяет значение коммутационной функции $K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u})$, характеризующей состояние ключа VT (см. рис. 8) на

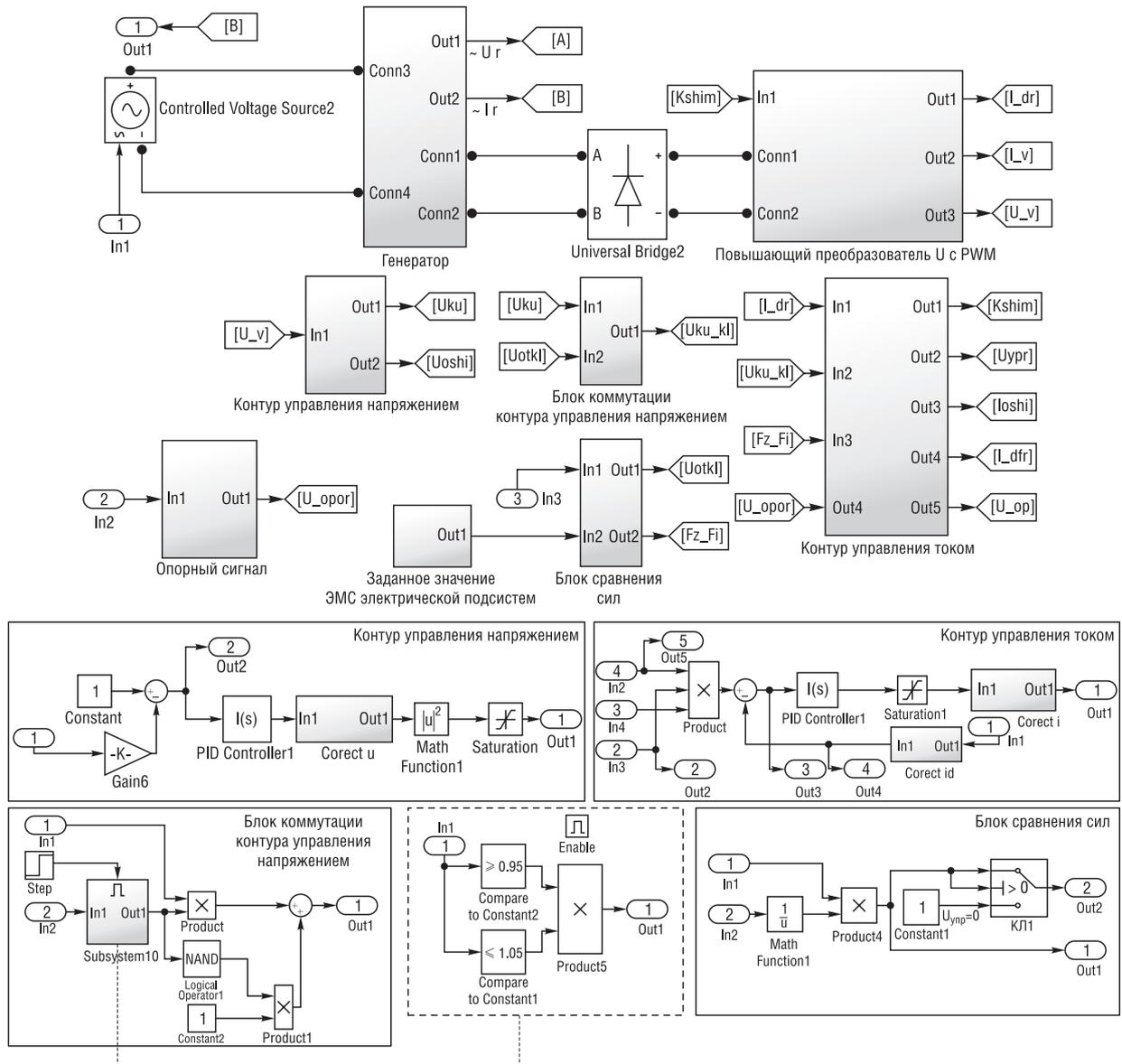


Рис. 9. Имитационные модели управляемого преобразователя, блока коммутации контура управления напряжением, блока сравнения сил механической и электрической подсистем в режиме «Работа»

Fig. 9. Simulation model of controlled converter, voltage control circuit switching unit, power comparison unit of mechanical and electrical subsystems in “Work mode”

каждом периоде ШИМ. На основании $K_{F_{i,u}}(\xi_{i,u})$ УП (НР) формирует ток i в рабочей обмотке генератора. Затем БФЭМС на основании тока i в рабочей обмотке генератора формирует ЭМС которая компенсирует рассогласование сил электрической и механической подсистем системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» в режиме «Работа».

Основные результаты имитационного моделирования системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» в режиме «Работа» представлены на рис. 11 и 12. Результаты имитационного моделирования системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» при согласованных силах электрической и механической подсистем в режиме «Работа» показаны на рис. 11.

На рис. 12 приводятся результаты имитационного моделирования системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа».

Анализ результатов имитационного моделирования системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» (см. рис. 11) показывает, что комбинированный ЭГВПД при согласованных силах электрической и механической подсистем в режиме «Работа» позволяет обеспечить непрерывное

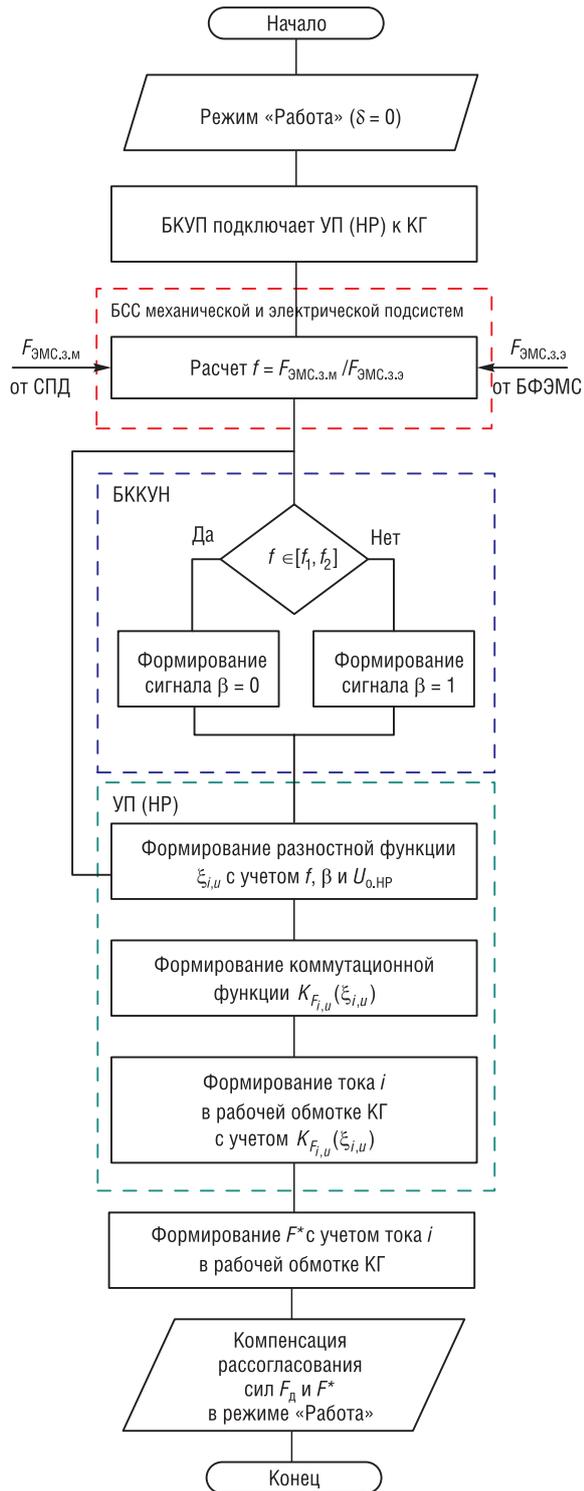


Рис. 10. Блок-схема алгоритма компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем системы «свободнопоршневой двигатель – электромеханотронный преобразователь на базе электрического генератора возвратно-поступательного движения» в режиме «Работа»

Fig. 10. Block diagram of the algorithm for compensation of power mismatch between electrical and mechanical subsystems of the “free-piston engine – electromechanotron converter based on an electric reciprocating generator” in the “Work mode”

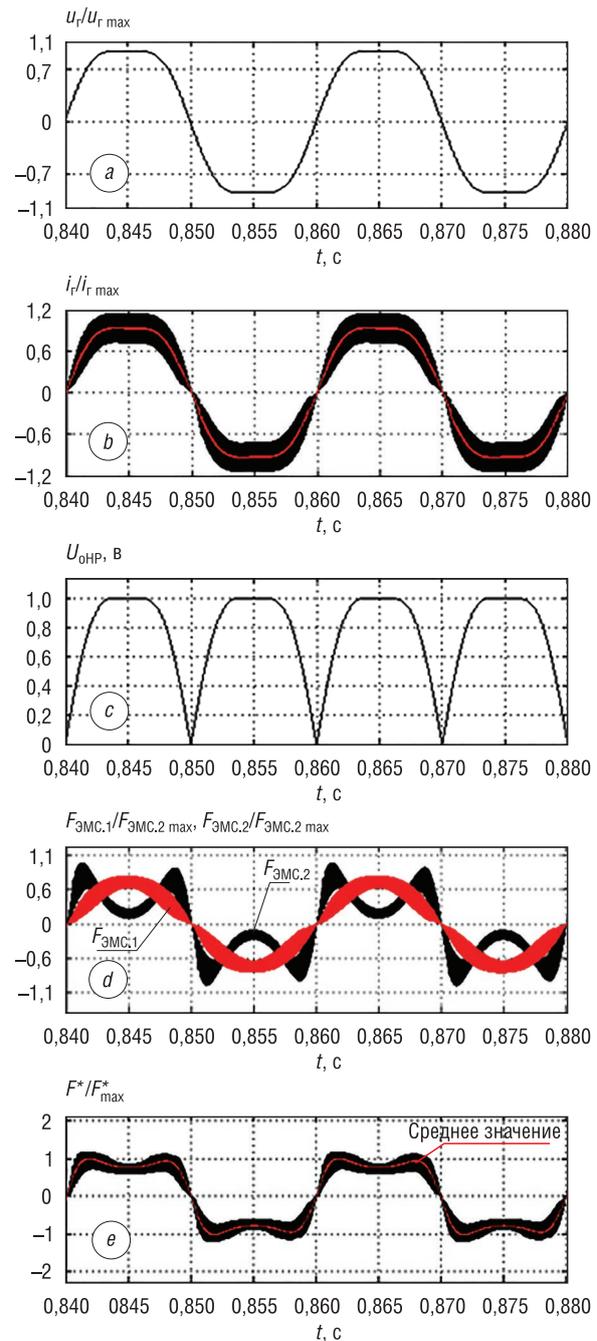


Рис. 11. Временные диаграммы: *a* – напряжения на зажимах рабочей обмотки комбинированного генератора; *b* – тока в рабочей обмотке комбинированного генератора; *c* – опорного сигнала; *d* – электромагнитных сил сформированных за счет поперечного и продольного изменения магнитных потоков соответственно; *e* – электромагнитная сила сформированная за счет комбинированного изменения магнитного потока при согласованных силах электрической и механической подсистем в режиме «Работа»

Fig. 11. Timing diagram: *a* – voltage at the terminals of the working winding of the combined generator; *b* – current in the working winding of the combined generator; *c* – reference signal; *d* – electromagnetic forces generated due to the transverse and longitudinal changes of the magnetic fluxes, respectively; *e* – electromagnetic forces formed due to the combined change in the magnetic flux at the agreed forces of the electrical and mechanical subsystems in the “Work mode”

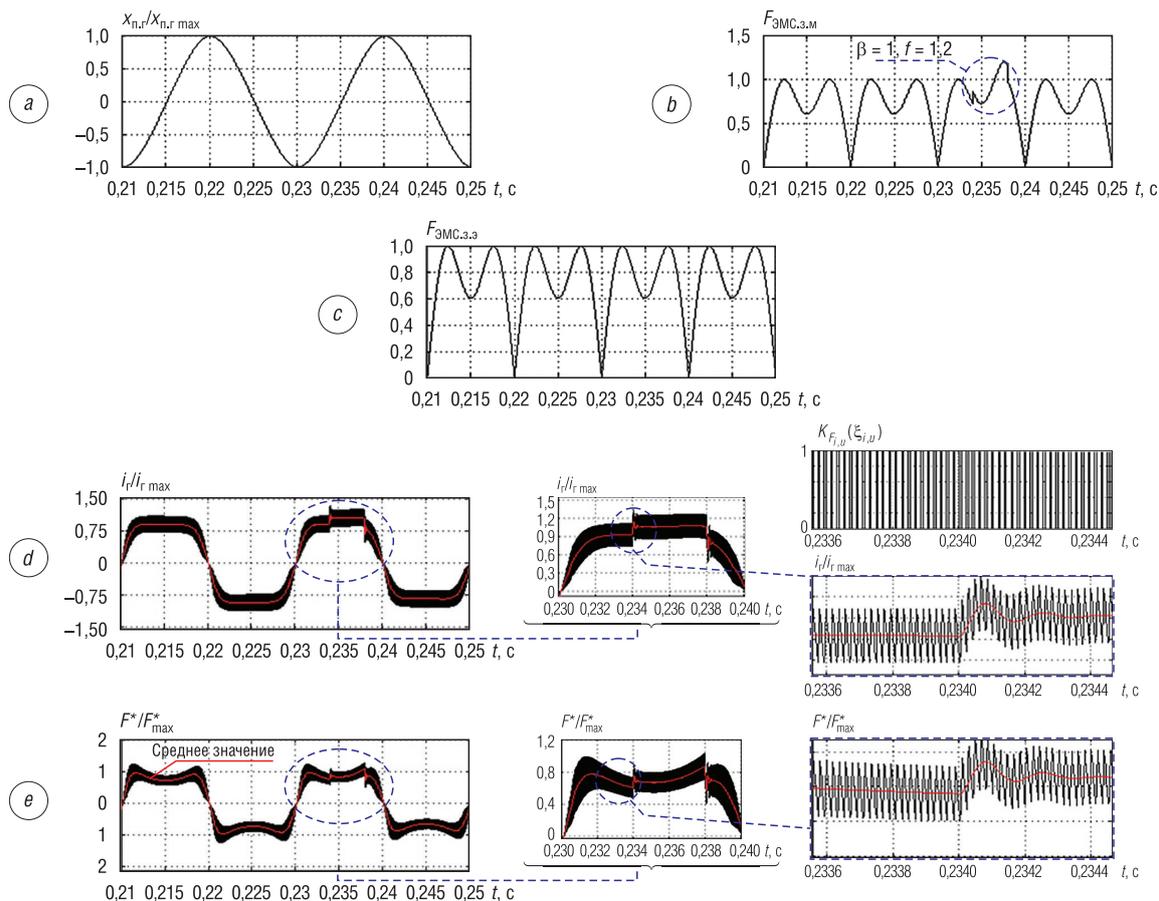


Рис. 12. Временные диаграммы: *a* – координаты перемещения поршневой группы; *b* – заданного значения электромагнитной силы от механической подсистемы; *c* – заданного значения электромагнитной силы от электрической подсистемы; *d* – тока в рабочей обмотке КГ и коммутационной функции; *e* – электромагнитная сила сформированная за счет комбинированного изменения магнитного потока при компенсации рассогласования сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа»

Fig. 12. Timing diagram: *a* – coordinates of the moving piston group; *b* – set value of the electromagnetic force from the mechanical subsystem; *c* – set value of the electromagnetic force from the electrical subsystem; *d* – current in the working winding of the combined generator and switching function; *e* – electromagnetic force formed due to the combined change in the magnetic flux when compensating for the mismatch of the forces of the electrical and mechanical subsystems in the “Work mode”

преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию на всем рабочем цикле системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД». Это повышает эффективность преобразования в системе «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию.

Также установлено (см. рис. 12), что комбинированный ЭГВПД, способен скомпенсировать рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа», что позволяет в данном режиме обеспечить баланс (согласования) сил механической и электрической подсистем и заданные значения кинематических параметров подвижной части системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД».

Заключение. Разработанная авторами в данной статье ИМ системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» дает возможность исследовать ее в различных режимах работы при изменении параметров электрической и механической подсистем. Особенностью разработанной ИМ является учет особенностей одновременного использования в магнитной системе ЭГВПД поперечного и продольного нелинейного изменения магнитных потоков.

Результаты проведенных исследований ИМ системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» позволили убедиться, что комбинированный ЭГВПД позволяет обеспечить непрерывное преобразование механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию на всем

рабочем цикле системы «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» и тем самым повысить эффективность преобразования в системе механической энергии возвратно-поступательного движения в электроэнергию; способен скомпенсировать рассогласование сил электрической и механической подсистем в режиме «Работа». А это в системе «СПД – ЭМТП на базе ЭГВПД» позволяет обеспечить баланс (согласования) сил механической и электрической подсистем и заданные значения кинематических параметров подвижной части системы.

Научная значимость полученных результатов заключается в развитии теории электромеханики применительно к ЭМПЭ возвратно-поступательного движения.

Список использованных источников

1. Зачепа, Ю. В. Автономные системы электроснабжения на базе асинхронных генераторов, основные требования и структура / Ю. В. Зачепа // *Электромеханічні і энергозберігаючі системи*. – 2010. – Вып. 2. – С. 32–40.
2. Цыркин, М. И. Дизельные агрегаты резервного питания / М. И. Цыркин, А. Я. Гольдингер. – СПб.: Чистое письмо, 2003. – 276 с.
3. Коськин, Ю. П. О терминологии и подготовке специалистов по электромеханотронике / Ю. П. Коськин, Д. В. Самохвалов // *Изв. С.-Петербург. гос. электротехн. ун-та «ЛЭТИ»*. – 2013. – № 1. – С. 57–66.
4. The free-piston linear generator potentials and challenges / F. Kock [et al.] // *MTZ Worldwide*. – 2013. – Vol. 74, № 10. – P. 38–43.
5. Hanipah, M. R. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications / M. R. Hanipah, R. Mikalsen, A. P. Roskilly // *Appl. Therm. Eng.* – 2015. – Vol. 75. – P. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>.
6. Пинский, Ф. И. Энергоустановки со свободнопоршневыми двигателем-генераторами / Ф. И. Пинский // *Мобильная техника*. – 2004. – № 2. – С. 13–17.
7. Тракторы XXI века: состояние и перспективы / С. Н. Поддубко [и др.]. – Минск: Беларус. навука, 2019. – 207 с.
8. Менжинский, А. Б. Универсальная методика электромагнитного расчета возвратно-поступательных электрических генераторов с поперечным и продольным нелинейным изменением магнитного потока / А. Б. Менжинский, А. Н. Малашин, Ю. Г. Коваль // *Изобретатель*. – 2019. – № 5–6. – С. 38–48.
9. Петриченко, Д. А. Подход к электромеханическому управлению крайними положениями поршня в свободнопоршневом генераторе / Д. А. Петриченко, Л. Ю. Лежнев // *Достижения вузов. науки*. – 2014. – № 12. – С. 109–117.
10. Герасимов, Д. В. Исследование особенностей проектирования свободнопоршневого электрогенератора / Д. В. Герасимов // *Изв. Самар. науч. центра Рос. акад. наук*. – 2000. – Т. 2, № 1. – С. 141–145.
11. Татарников, А. П. Разработка алгоритмов управления свободнопоршневой энергоустановки / А. П. Татарников, Д. А. Петриченко, В. В. Иванов // *Современные тенденции развития науки и технологий: сб. науч. тр. по материалам IX Междунар. науч.-практ. конф., 31 дек. 2015 г.: в 8 ч.* – Белгород: ИП Ткачева Е. П., 2015. – № 6–2. – С. 117–122.
12. Менжинский, А. Б. Согласование сил механической и электрической подсистем энергоустановки со свободнопоршневым двигателем и электрическим генератором возвратно-поступательного типа / А. Б. Менжинский // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук*. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 304–320. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-304-320>
13. Розанов, Ю. К. Силовая электроника: учеб. для вузов / Ю. К. Розанов, М. В. Рябчицкий, А. А. Кваснюк. – М.: Изд. дом МЭИ, 2016. – 632 с.

References

1. Zachepa Yu. V. Autonomous power supply systems based on asynchronous generators, basic requirements and structure. *Elektromekhanichni i energozberigayuchi sistemi = Electromechanical and Energy Saving Systems*, 2010, iss. 2, pp. 32–40 (in Russian).
2. Tsyarkin M. I., Gol'dinger A. Ya. *Diesel Backup Power Units*. St. Petersburg, Chistoe pis'mo Publ., 2003. 276 p. (in Russian).
3. Kos'kin Yu. P., Samokhvalov D. V. About terminology and the training of specialists in electromechatronic. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo elektrotekhnicheskogo universiteta "LETI" = Izvestiya SPbGETU "LETI"*, 2013, no. 1, pp. 57–66 (in Russian).
4. Kock F., Heron A., Rinderknecht F., Friedrich H. E. The free-piston linear generator potentials and challenges. *MTZ Worldwide*, 2013, vol. 74, no. 10, pp. 38–43. <https://doi.org/10.1007/s38313-013-0099-z>
5. Hanipah M. R., Mikalsen R., Roskilly A. P. Recent commercial free-piston engine developments for automotive applications. *Applied Thermal Engineering*, 2015, vol. 75, pp. 493–503. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.039>
6. Pinskiy F. I. Power plants with free piston engine generators. *Mobil'naya tekhnika [Mobile Technology]*, 2004, no. 2, pp. 13–17 (in Russian).
7. Poddubko S. N., Amel'chenko P. A., Stasilevich A. G., Vityaz' P. A., Dubovik D. A., Vashchula A. V., Zhukovskii I. N., Klyuchnikov A. V. *21st Century Tractors: State and Prospects*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2019. 207 p. (in Russian).

8. Menzhinskii A. B., Malashin A. N., Koval' Yu. G. Universal method of electromagnetic calculation of reciprocating electric generators with transverse and longitudinal non-linear changes in magnetic flux. *Izobretatel'* [Inventor], 2019, no. 5–6, pp. 38–48 (in Russian).

9. Petrichenko D. A., Lezhnev L. J. The Electromechanical approach to the management of the extreme positions of the piston free piston generator. *Dostizheniya vuzovskoi nauki* [Achievements of High School Science], 2014, no. 12, pp. 109–117 (in Russian).

10. Gerasimov D. V. Study of design features of a free-piston electric generator. *Izvestiya Samarskogo nauchno-go tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*, 2000, vol. 2, no. 1, pp. 141–145 (in Russian).

11. Tatarnikov A. P., Petrichenko D. A., Ivanov V. V. Development of control algorithms for a free piston power plant. *Sovremennye tendentsii razvitiya nauki i tekhnologii: sbornik nauchnykh trudov po materialam VI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 30 sentyabrya 2015 g. No. 6, ch. 2* [Current Trends in the Development of Science and Technology: A Collection of Scientific Papers Based on the Materials of the VI International Scientific and Practical Conference, September 30, 2015. Vol. 6-2]. Belgorod, IP Tkacheva E. P., 2015, pp. 117–122 (in Russian).

12. Menzhinskii A. B. Coordination of forces of mechanical and electric subsystems of power plant with free piston engine and electric generator of reciprocating type. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 304–320 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2019-64-3-304-320>

13. Rozanov Yu. K., Ryabchitskii M. V., Kvasnyuk A. A. *Power Electronics*. Moscow, Publ. House of the Moscow Energy Institute, 2016. 632 p. (in Russian).

Информация об авторах

Менжинский Андрей Борисович – старший преподаватель, кафедра электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: volna05011990@mail.ru

Малашин Андрей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электротехники и систем электропитания, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь).

Information about the authors

Andrei B. Menzhinsky – Senior Lecturer, Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: volna05011990@mail.ru

Andrey N. Malashin – Ph. D. (Engineering), Assistant Professor, Professor of the Chair of Electrical Equipment and Power Supply Systems, Military Academy of Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus).

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS AND INSTRUMENT-MAKINGУДК 621.382.323.049.774.2:539.216(045)(476)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-97-103>Поступила в редакцию 14.11.2019
Received 14.11.2019**Н. Л. Лагунович***Филиал «Научно-технический центр «Белмикросистемы» Открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ», Минск, Республика Беларусь***ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ОХРАННЫХ КОЛЕЦ И УДЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЭПИТАКСИАЛЬНОЙ ПЛЕНКИ МОЩНОГО *n*-КАНАЛЬНОГО ДМОП-ТРАНЗИСТОРА**

Аннотация. Рассмотрен мощный *n*-канальный ДМОП-транзистор с пробивным напряжением сток-исток $U_{\text{си проб}}$ выше 800 В и пороговым напряжением от 2 до 5 В, по периметру которого при изготовлении часто формируют одно или несколько охранных колец для повышения пробивных напряжений. Описана оптимальная конструкция охранных колец, а также установлено значение удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ρ_v для получения требуемого значения $U_{\text{си проб}}$ транзистора. Построена регрессионная модель, с помощью которой выбраны наиболее оптимальные варианты конструкции охранных колец исследуемого транзистора, и значение ρ_v , в которой изготавливается прибор. Установлено, что применение пятимерного полинома второго порядка в качестве регрессионной модели дает возможность определить оптимальные значения топологических зазоров в области охранных колец и удельного сопротивления ρ_v , позволяющие получать требуемые величины $U_{\text{си проб}}$ транзистора. Экспериментальные значения пробивного напряжения сток-исток транзистора составили 876 и 875 В, а расчетные (при одинаковых параметрах построенной регрессионной модели) – соответственно 874 и 880 В, что составило погрешности 0,23 % и 0,57 %, то есть построенная модель дает хорошее согласование с экспериментальными данными. Установлено, что ρ_v вносит более существенный вклад в значения пробивных напряжений транзистора, чем параметры конструкции охранных колец. Данный *n*-канальный ДМОП-транзистор, применяемый в различных электронных устройствах для энергетики, в мобильных телефонах, в составе высоковольтных интегральных микросхем AC/DC- и DC/DC-конвертеров и высоковольтных, высокостабильных LED-драйверов, был изготовлен в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» по разработанному автором технологическому маршруту.

Ключевые слова: регрессионный анализ, пятимерный полином второго порядка, мощный *n*-канальный ДМОП-транзистор, охранный кольцо, пробивное напряжение сток-исток

Для цитирования: Лагунович, Н. Л. Оптимизация конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки мощного *n*-канального ДМОП-транзистора / Н. Л. Лагунович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 97–103. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-97-103>

Nataliya L. Lagunovich*Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Openly Joint-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company, Minsk, Republic of Belarus***OPTIMIZATION OF GUARD RINGS CONSTRUCTION AND EPITAXIAL FILM RESISTIVITY OF POWER *n*-CHANNEL DMOS-TRANSISTOR**

Abstract. Powerful *n*-channel DMOS-transistor with drain-source breakdown voltage $U_{\text{ds br}}$ value over 800 V and threshold voltage from 2 to 5 V was considered in this paper. One or more guard rings are formed on perimeter of such transistor for the breakdown voltage raising. The optimal guard rings construction was described and resistivity value of epitaxial film ρ_v was determined for obtaining required transistor $U_{\text{ds br}}$ value. The regression model was built, with the help of which the

most optimal construction variants of guard rings of investigated transistor and resistivity value of epitaxial film, were selected. It was established that the five-dimensional polynomial of second order using as regression model allowed choosing the optimal topological spaces values in the guard rings area and ρ_s value which made it possible to obtain required $U_{ds,br}$ values of the transistor. Experimental values of transistor drain-source breakdown voltage were 876 and 875 V, but calculated values (at identical parameters of definitional regression model) were 874 and 880 V, accordingly, that were errors of 0.23 % and 0.57 %, i. e. made model fits well with experimental data. It was established that ρ_s makes contribution to breakdown voltages values of the transistor that is more substantial than parameters of guard rings construction. This NDMOS-transistor was manufactured under production conditions of OJSC INTEGRAL – “INTEGRAL” Holding Managing Company according to the technological route developed by the author. Such device is used in various electronic devices for energetics, in mobile phones, as part of high-voltage integrated circuits of AC/DC- and DC/DC-converters and high-voltage, high-stable LED-drivers.

Keywords: regression analysis, five-dimensional polynomial of second order, power n -channel DMOS-transistor, guard ring, drain-source breakdown voltage

For citation: Lagunovich N. L. Optimization of guard rings construction and epitaxial film resistivity of power n -channel DMOS-transistor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 97–103 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-97-103>

Введение. МОП-транзисторы с двойной диффузией, называемые ДМОП-транзисторами, широко используются как в дискретном исполнении, так и в составе интегральных микросхем (ИМС) силовой электроники для повышения рабочих напряжений питания схем. Основные достоинства структуры такого транзистора: высокое пробивное напряжение, большая величина входного импеданса, низкое пороговое напряжение, низкое сопротивление сток-исток в открытом состоянии, высокая скорость переключения, униполярность, совместимость с логикой на основе комплементарных ключей на МОП-транзисторах (КМОП), отсутствие уходов параметров при изменении температуры, отсутствие вторичного пробоя, – определяют перспективы его применения.

В высоковольтных структурах явления пробоя наиболее вероятны по периметру активной области прибора, то есть той области, которая работает непосредственно как транзистор, диод и т. п. С целью повышения пробивного напряжения таких структур по их периметру делают одно или несколько охранных колец [1, 2] с глубиной, превышающей глубину p - n -переходов активной области прибора. Ширина кольца выбирается минимальной (от 5 до 10 мкм), чтобы не увеличивать емкость p - n -перехода. При изготовлении мощных высоковольтных приборов [3, 4], каким является рассматриваемый в данной работе транзистор с пробивным напряжением сток-исток $U_{си,проб}$ свыше 800 В и пороговым напряжением от 2 до 5 В, содержащий несколько охранных колец, часто возникает задача определить их оптимальную конструкцию [5] и значения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки для получения требуемого значения пробивного электрического напряжения p - n -перехода.

Модель объекта исследования. В данной работе высоковольтный n -канальный ДМОП-транзистор рассматривается как сложная система, которая характеризуется значительным числом взаимосвязанных параметров. При исследовании подобных систем ставится задача установить зависимость между входными параметрами (факторами) и выходными параметрами системы, а также определить уровни входных параметров, при которых выходные параметры системы оптимальны. На рис. 1 изображена модель объекта исследования, которую называют кибернетической системой [6]. В ней величины x_1, x_2, \dots, x_k – управляемые факторы, соответствующие воздействиям на систему; величины Y_1, Y_2, \dots, Y_L – параметры (критерии), подлежащие оптимизации. На различные наборы уровней факторов система дает различный отклик. Между уровнями факторов и реакцией (откликом) системы существует взаимосвязь, которую можно описать общим выражением вида [6]



Рис. 1. Схема кибернетической системы
Fig. 1. Scheme of a cybernetic system

$$Y_L = \Psi_L(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (L = 1, 2, \dots, m), \quad (1)$$

где функция Ψ_L – функция отклика.

Выражение (1) является уравнением регрессии в общем виде. Функции отклика Ψ , которая связывает параметр оптимизации с факторами, соответствует геометрический образ, называемый поверхностью отклика. Исследователю

заранее не известен вид зависимостей Ψ , поэтому ему приходится получать по данным эксперимента приближенные уравнения [6]

$$\hat{Y}_L = \varphi_L(x_1, x_2, \dots, x_k) \quad (L = 1, 2, \dots, m), \tag{2}$$

где \hat{Y}_L – приближенные значения параметров, подлежащих оптимизации; φ_L – приближенные выражения функции отклика.

В таком случае необходимо так поставить эксперимент, чтобы можно было построить математическую модель системы и найти оптимальные значения ее свойств при минимальном количестве опытов, варьируя при этом величины независимых переменных по специально сформулированным правилам.

Оптимизация конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки мощного *n*-канального ДМОП-транзистора с помощью регрессионной модели. Зависимость (1) иногда в явном виде выражают полиномом (обычно второго порядка), который использован в данной работе как регрессионная модель для нахождения оптимальной конструкции охранных колец и определения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки ρ_v исследуемого транзистора. В качестве уровней факторов рассматривались зазоры между охранными кольцами и значения удельного сопротивления эпитаксиальной пленки, используемой для получения МОП-транзисторов с пробивными напряжениями сток-исток от 400 до 800 В. Значения входных параметров (факторов) задавались технологическими маршрутами изготовления приборов и конструкцией охранных колец. Значения выходных статических и динамических параметров транзисторов были измерены. В качестве выходных параметров транзистора рассматривались величины пробивного напряжения, для описания зависимости которого от зазоров между охранными кольцами и значений ρ_v был использован пятимерный полином второго порядка

$$Y = A_{00} + A_{10} \cdot X_1 + A_{20} \cdot X_2 + A_{30} \cdot X_3 + A_{40} \cdot X_4 + A_{50} \cdot X_5 + A_{11} \cdot X_1^2 + A_{22} \cdot X_2^2 + A_{44} \cdot X_4^2 + A_{55} \cdot X_5^2 + A_{12} \cdot X_1 \cdot X_2 + A_{14} \cdot X_1 \cdot X_4 + A_{15} \cdot X_1 \cdot X_5 + A_{23} \cdot X_2 \cdot X_3 + A_{24} \cdot X_2 \cdot X_4 + A_{34} \cdot X_3 \cdot X_4 + A_{35} \cdot X_3 \cdot X_5, \tag{3}$$

где Y – значение пробивного напряжения; переменные X_1, X_2, X_3, X_4 – варьируемые в конструкции охранных колец размеры; переменная X_5 – удельное сопротивление эпитаксиального слоя ρ_v ; A_{ij} – коэффициенты полинома.

Величины X_1, X_2, X_3, X_4 , которые задаются на этапе проектирования прибора, показаны на рис. 2. Они представляют собой топологические зазоры и перекрытия в области охранных колец исследуемого транзистора. Фактор X_1 – это зазор между областью p^+ -типа и активной областью прибора; значение X_2 показывает, насколько слой поликремния перекрывает активную область; X_3 – это зазор между областью p^+ -типа и первым охранным кольцом транзистора; фактор X_4 – это зазор между охранными кольцами. В процессе выполнения эксперимента их значения варьировались в допустимых диапазонах без значительного увеличения площади кристалла транзистора, но при этом позволяющих получать требуемые величины $U_{си\ проб}$ прибора. Величина X_5 определяется условиями формирования эпитаксиальной пленки и, как известно из большого количества эмпирических

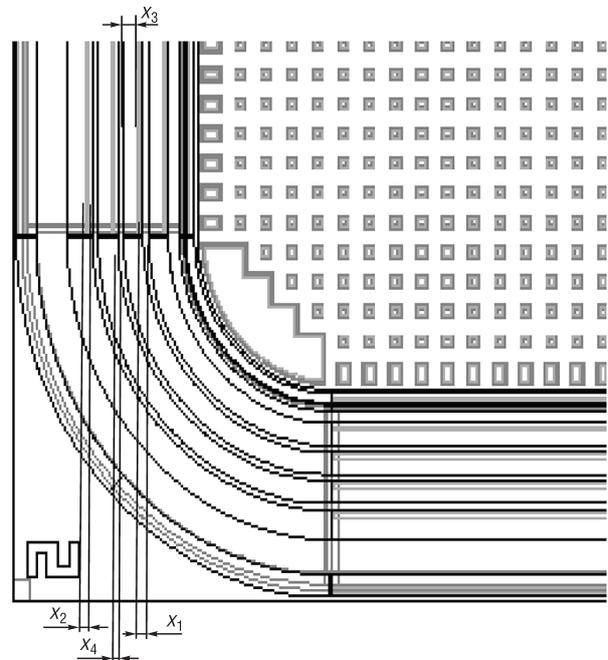


Рис. 2. Фрагмент топологии мощного *n*-канального ДМОП-транзистора с пробивным напряжением сток-исток свыше 800 В

Fig. 2. Topology fragment of the powerful *n*-channel DMOS-transistor with the drain-source breakdown voltage over 800 V

исследований, оказывает очень существенное влияние на пробивные характеристики приборов. Следовательно, оптимизация ее значения с целью получения требуемых величин $U_{\text{си проб}}$ транзистора также занимает важное место в процессе исследований, проведенных в рамках данной работы. Переменной Y присваивались измеренные значения пробивных напряжений сток-исток, которые, как уже было отмечено, варьировались в пределах от 400 до 800 В.

Таким образом, с помощью определенных конструктивных значений в области охранных колец X_1, X_2, X_3, X_4 , а также величин ρ_v эпитаксиальной пленки, в которой формировался прибор, X_5 был получен ряд конкретных значений $U_{\text{си проб}}$ n -канального ДМОП-транзистора. Варьировавшиеся в процессе экспериментальных исследований факторы X_1, X_2, X_3, X_4 и X_5 и полученные в результате величины пробивного напряжения Y были сведены в единую таблицу в программе Excel, где был выполнен регрессионный анализ, в процессе которого рассчитаны значения коэффициентов A_{ij} уравнения (3). Поскольку программа Excel имеет ограничения по объему расчетов при выполнении регрессионного анализа, значения коэффициентов $A_{33}, A_{13}, A_{25}, A_{45}$ были приняты равными нулю.

Регрессионная модель (выражение (3)) дает возможность получать требуемые величины $U_{\text{си проб}}$, варьируя размеры в конструкции охранных колец и значения ρ_v , позволяя подобрать их оптимальные конструкцию и значение для того, чтобы установить необходимую величину пробивного напряжения. Модель хорошо согласуется с экспериментальными данными и дает напряжения пробоя, близкие к реальным, что видно из табл. 1, где представлены как экспериментальные, так и расчетные значения $U_{\text{си проб}}$ исследуемого прибора. Как следует из табл. 1, измеренные значения $U_{\text{си проб}}$ транзистора составили 876 и 875 В. Полученные при таких же величинах X_1, X_2, X_3, X_4 и X_5 расчетные значения $U_{\text{си проб}}$ равны 874 и 880 В, то есть погрешности вычислений составили 0,23 и 0,57 %. Таким образом, погрешность моделирования находится в диапазоне ± 1 %, что подтверждает правильность выбранного эмпирико-статистического метода исследований и построенной на его основе регрессионной модели.

Т а б л и ц а 1. Экспериментальные и расчетные значения пробивного напряжения сток-исток $U_{\text{си проб}}$ исследуемого транзистора

Table 1. Experimental and calculated drain-source breakdown voltage $U_{\text{ds br}}$ values of the investigated transistor

Экспериментальные значения $U_{\text{си проб}}$, В	Результаты расчетов $U_{\text{си проб}}$, В	Погрешность расчетов, %
876	874	0,23
875	880	0,57

Т а б л и ц а 2. Варианты конструкции охранных колец мощного n -канального ДМОП-транзистора

Table 2. The design options of the powerful n -channel DMOS transistor guard rings

№ варианта конструкции охранных колец	Зазор p^+ -область – активная область, X_1 , мкм	Перекрытие поликремний – активная область, X_2 , мкм	Зазор p^+ -область – первое охрannое кольцо, X_3 , мкм	Зазор между охранными кольцами, X_4 , мкм
1	19	17	54	28
2	19	17	60	33
3	19	23	60	28
4	19	23	54	33
5	25	17	60	28
6	25	17	54	33
7	25	23	54	28
8	25	23	60	33
9	22	20	57	31

Степень влияния конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки на значения пробивных напряжений. С целью определения степени влияния конструкции охранных колец и значения ρ_v эпитаксиальной пленки на величины пробивных напряжений автором был осуществлен дисперсионный анализ, методика которого описана в [7]. Алгоритм данной методики заложен в основу программы для статистического анализа Stadia, при помощи которой выполнен дисперсионный анализ. В программе Stadia в строках таблицы исходных данных задавались значения напряжения пробоя, соответствующие конкретным величинам удельного сопротивления эпитаксии ρ_v (четыре значения ρ_v – четыре строки). В столбцах таблицы исходных данных напряжения пробоя соответствовали определенной конструкции охранных колец (девять вариантов конструкции – девять столбцов).

Для выяснения влияния конструкции охранных колец на значения пробивного напряжения проводился однофакторный дисперсионный анализ. Было взято девять уровней фактора (девять вариантов конструкции, которые даны в табл. 2). Исходные данные задавались в виде таблицы с девятью столбцами, в каждом из которых приводились значения

пробивных напряжений, соответствующие одному из девяти уровней фактора (вариантов конструкции охранных колец). В результате расчетов определено, что фактор оказывает влияние на пробивное напряжение с вероятностью $P = 0,98$.

Двухфакторный дисперсионный анализ показал, что на величины $U_{\text{си проб}}$ оказывают влияние как конструкция охранных колец, так и значения ρ_v . Установлено, что удельное сопротивление эпитаксиальной пленки вносит более существенный вклад в значения пробивных напряжений транзистора, а вероятность того, что величина ρ_v влияет на значения пробивных напряжений, равна $P = 1$.

Экспериментальная оценка влияния конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки на значения пробивных напряжений. По разработанному автором технологическому маршруту в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» были изготовлены экспериментальные образцы мощного ДМОП-транзистора на пластинах типа КЭС-0,01 (кремний электронного типа проводимости, легированный сурьмой, с удельным сопротивлением $\rho_v = 0,01 \text{ Ом} \cdot \text{см}$) с эпитаксией типа 70 КЭФ-40 (кремниевая эпитаксиальная пленка электронного типа проводимости, легированная фосфором, толщиной 70 мкм с удельным сопротивлением $\rho_v = 40 \text{ Ом} \cdot \text{см}$). Технологический маршрут формирования структуры исследуемого ДМОП-транзистора включал следующие основные этапы:

- 1) наращивание толстой высокоомной эпитаксиальной пленки n -типа на сильнолегированной пластине n^+ -типа;
- 2) формирование p^+ -областей охранных колец по периметру прибора путем ионного легирования бором и его последующей разгонки;
- 3) формирование поликремниевого затвора;
- 4) формирование областей p -типа (базы) ДМОП-транзистора путем ионного легирования бором и его последующей разгонки;
- 5) формирование областей истоков n^+ -типа методом ионного легирования фосфором и его последующей разгонки;
- 6) нанесение межслойного окисла и создание в нем контактных окон;
- 7) напыление металла для формирования контактов к высоколегированным областям.

При изготовлении экспериментальных образцов в соответствии с данным маршрутом был реализован план эксперимента по конструкции охранных колец, представленный в табл. 2. На полученных образцах транзистора были измерены его статические и динамические параметры. Значения пробивных напряжений сток-исток транзистора для девяти различных вариантов конструкции охранных колец, а также для случаев, когда измерения выполнялись как на кристаллах без корпуса, так и на приборах, собранных в корпус, представлены в табл. 3. Из данной таблицы видно, что максимальная величина пробивного напряжения сток-исток транзистора без корпуса была получена для варианта конструкции охранных колец № 8. Однако наибольшие пробивные напряжения на приборах, собранных в корпус, получены для вариантов № 7–9. Кроме того, на приборах с конструкцией охранных колец № 9 пороговое напряжение транзистора было наиболее близким к середине интервала требуемых значений, а значение времени задержки включения транзистора ниже, чем на приборах с конструкциями № 7 и 8. Таким образом, установлено, что для серийного производства исследуемого мощного транзистора оптимальной является конструкция № 9.

По приведенному технологическому маршруту экспериментальные образцы изготавливались неоднократно [4], и измерения статических и динамических характеристик прибора также выполнялись большое количество

Таблица 3. Значения пробивных напряжений сток-исток $U_{\text{си проб}}$ мощного n -канального ДМОП-транзистора, измеренные как на кристаллах без корпуса, так и на приборах, собранных в корпус

Table 3. Drain-source breakdown voltage $U_{\text{ds br}}$ values of the power n -channel DMOS-transistor, measured both on crystals without the case, and on devices assembled in the case

№ варианта конструкции охранных колец	Средние значения $U_{\text{си проб}}$ транзистора, В	
	измеренные на кристаллах без корпуса	измеренные на приборах, собранных в корпус
1	879	866
2	831	829
3	875	865
4	867	864
5	875	870
6	879	870
7	878	875
8	880	875
9	879	875

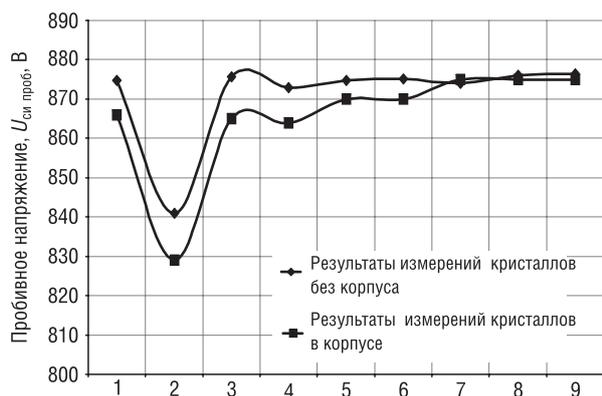


Рис. 3. Значения пробивного напряжения мощного n -канального ДМОП-транзистора, измеренные на его кристаллах без корпуса и собранных в корпус, в зависимости от варианта конструкции охранных колец

Fig. 3. Drain-source breakdown voltage values of the power n -channel DMOS-transistor, measured both on its crystals without the case, and on devices assembled in the case, depending on the guard rings design

Таким образом, в процессе исследований было установлено, что наиболее оптимальной является конструкция охранных колец №9, которая позволяет получать не только высокие значения пробивных напряжений сток-исток исследуемого транзистора, но и оптимальные значения других статических и динамических параметров прибора (пороговое напряжение, время задержки включения транзистора и т. д.).

Закключение. С помощью регрессионного анализа были выполнены оптимизация конструкции охранных колец и удельного сопротивления эпитаксиальной пленки мощного n -канального ДМОП-транзистора, что позволило получить требуемые (свыше 800 В) величины пробивного напряжения сток-исток прибора, максимальные экспериментальные значения которого составили от 875 до 880 В. Полученные с помощью регрессионной модели расчетные величины $U_{\text{си проб}}$ отличаются от соответствующих экспериментальных данных на 2–5 В, то есть погрешность вычислений составила 0,23–0,57 %.

С помощью дисперсионного анализа установлено, что на величину $U_{\text{си проб}}$ оказывают влияние как конструкция охранных колец, так и значение ρ_v , причем последнее вносит более существенный вклад в значения пробивных напряжений прибора. Была оценена разница между величиной пробивного напряжения $U_{\text{си проб}}$ экспериментального образца транзистора без корпуса и значением $U_{\text{си проб}}$ прибора, собранного в корпус, которая составила от 0 до 11 В в зависимости от варианта конструкции транзистора.

Исследованный транзистор был изготовлен в условиях производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» по разработанному автором технологическому маршруту и широко применяется в различных электронных устройствах для энергетики, в мобильных телефонах, в составе высоковольтных интегральных микросхем AC/DC- и DC/DC-конвертеров и высоковольтных, высокостабильных LED-драйверов.

Список использованных источников

- Шахмаева, А. Р. Конструктивно-технологические методы улучшения параметров полупроводниковых приборов / А. Р. Шахмаева, П. Р. Захарова // Вестн. Саратов. гос. техн. ун-та. – 2012. – № 1, вып. 1. – С. 36–40.
- Лагунович, Н. Л. Усовершенствованный технологический маршрут формирования биполярного транзистора со статической индукцией / Н. Л. Лагунович // Наука и техника. – 2018. – Т. 17, № 1. – С. 72–78. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-72-78>
- Лоренц, Л. Состояние и направления дальнейшего развития в сфере разработки производства и применения силовых полупроводниковых приборов / Л. Лоренц // Электротехника. – 2001. – № 12. – С. 2–12.
- Моделирование кремниевого мощного вертикального n -канального ДМОП-транзистора / Н. Л. Дудар [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2006. – Т. 50, № 5. – С. 93–97.

раз с целью набора нужного объема статистических данных. Результаты измерений, приведенные в табл. 3, соответствуют данным, представленным на рис. 3, на котором видно, насколько сборка кристалла в корпус влияет на величину пробивного напряжения сток-исток прибора для различных конструкций его охранных колец. С помощью табл. 3 и рис. 3 можно оценить разницу между величиной пробивного напряжения $U_{\text{си проб}}$ кристалла без корпуса и значением $U_{\text{си проб}}$ прибора, собранного в корпус. Данная разница составила от 11 В для транзистора с конструкцией №2 и до 0 В для конструкции №8. Минимальные различия между величиной $U_{\text{си проб}}$ кристалла без корпуса и значением $U_{\text{си проб}}$ прибора, собранного в корпус, получены для конструкций №7–9, что еще раз подтверждает оптимальность указанных вариантов для случая получения требуемой величины $U_{\text{си проб}}$.

5. Avset, B.S. The effect of metal field plates on multiguard structures with floating p^+ guard rings / B.S. Avset, L. Evensen // Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A. – 1996. – Vol. 377, iss. 2–3. – P. 397–403. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00194-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00194-5)
6. Зедгинидзе, И.Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем / И.Г. Зедгинидзе. – М.: Наука, 1976. – 390 с.
7. Шеффе, Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе. – М.: Наука, 1980. – 512 с.

References

1. Shakhmaeva A. R., Zaharova P. R. Construction and Technological Methods for Improvement of Semi-Conductor Parameters. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Saratov State Technical University*, 2012, no. 1 (63), iss. 1, pp. 36–40 (in Russian).
2. Lagunovich N. L. Improved Process Flow for Formation of Bipolar Static Induction Transistor. *Nauka i tehnika = Science & Technique*, 2018, vol. 17, no. 1, pp. 72–78 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-17-1-72-78>
3. Lorents L. Trends in power integration, state-of-the art and future. *Elektrotehnika = Electrical Engineering*, 2001, no. 12, pp. 2–12 (in Russian).
4. Dudar N. L., Leonov N. I., Getman S. N., Nelaev V. V., Krasikov M. G. The Simulation of the Silicon Power Vertical N-channel DMOS-transistor. *Doklady Nacional'nai akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2006, vol. 50, no. 5, pp. 93–97 (in Russian).
5. Avset B. S., Evensen L. The effect of metal field plates on multiguard structures with floating p^+ guard rings. *Nuclear Instruments and Methods in Physical Research. Section A*, 1996, vol. 377, iss. 2–3, pp. 397–403. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(96\)00194-5](https://doi.org/10.1016/0168-9002(96)00194-5)
6. Zedginidze I. G. *Experiment Planning for Investigation of Multicomponent Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1976. 390 p. (in Russian).
7. Sheffe G. *The Analysis of Variance*. Moscow, Nauka Publ., 1980. 512 p. (in Russian).

Информация об авторе

Лагунович Наталья Леонидовна – кандидат технических наук, ведущий инженер, Филиал «Научно-технический центр «Белмикросистемы» Открытого акционерного общества «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Корженевского, 12, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n_dudarby@tut.by

Information about the author

Nataliya L. Lagunovich – Ph. D. (Engineering), Advanced Engineer, Affiliate Research & Design Center “Belmicrosystems” of Open Joint-Stock Company “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company (12, Korzhenevskii Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n_dudarby@tut.by

М. А. Асаёнок¹, А. О. Зеневи́ч¹, Е. В. Новиков¹, С. А. Сорока²

¹Белорусская государственная академия связи, Минск, Республика Беларусь,

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА АМПЛИТУДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРЕМНИЕВЫХ ФОТОЭЛЕКТРОННЫХ УМНОЖИТЕЛЕЙ

Аннотация. Определены зависимости вида амплитудного распределения импульсов, созданных фототоком кремневых фотоэлектронных умножителей, от интенсивности регистрируемого оптического излучения. В качестве объектов исследования использовались серийно выпускаемые кремневые фотоэлектронные умножители Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035, а также умножители из опытной партии, произведенной ОАО «ИНТЕГРАЛ» (Республика Беларусь). Выполнены исследования амплитудного распределения импульсов напряжения, сформированных на нагрузочном резисторе кремневых фотоэлектронных умножителей фототоком, для различных значений энергетической экспозиции оптических импульсов. Определен диапазон значений энергетической экспозиции оптических импульсов, в котором амплитудные распределения выходных импульсов фотоумножителей имеют ярко выраженные пики. Установлено, что с увеличением энергетической экспозиции оптического импульса часть пиков исчезает, а все зависимости средней амплитуды таких импульсов от величины энергетической экспозиции оптического импульса для кремневых фотоэлектронных умножителей имеют линейный участок. Показано, что увеличение энергетической экспозиции оптических импульсов приводит к росту дисперсии амплитудного распределения выходных импульсов фотоумножителей. Получено, что для линейной зависимости энергетической экспозиции оптического импульса от длительности оптического импульса в диапазоне от 50 нс до 1 мкс исследуемые кремневые фотоэлектронные умножители формировали импульсы напряжения длительностью 1 мкс с одинаковыми фронтами нарастания и спада. При этом средняя амплитуда этих импульсов имела линейную зависимость от длительности оптического импульса. Полученные результаты могут найти применение при проектировании фотоприемных устройств контроля уровня ионизирующего излучения для атомных электростанций, для квантовых информационных систем и в оптической связи при передаче информации с контролем наличия каналов утечки информации.

Ключевые слова: амплитудное распределение, кремниевый фотоэлектронный умножитель, интенсивность регистрируемого оптического излучения, длительность оптических импульсов

Для цитирования: Влияние параметров оптического излучения на амплитудные характеристики кремневых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаёнок [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 104–109. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-104-109>

Maryna A. Asayonak¹, Andrey O. Zenevich¹, Yauhen V. Novikau¹, Syargey A. Saroka²

¹Belarusian State Academy of Communications, Minsk, Republic of Belarus

²State Scientific and Practical Association «Optics, Optoelectronics and Laser Technology», Minsk, Republic of Belarus

INFLUENCE OF OPTICAL RADIATION PARAMETERS ON THE AMPLITUDE CHARACTERISTICS OF SILICON PHOTOELECTRON MULTIPLIERS

Abstract. At present, silicon photoelectronic multipliers with a low voltage, high sensitivity in the visible and near infrared spectral regions, and large amplification factors are often used to record optical radiation in a wide range of intensities of the visible and near infrared spectral regions. The purpose of this article is to determine the dependence of the type of amplitude distribution of pulses, created by silicon photoelectronic multipliers, on the intensity of the recorded optical radiation. As research objects, commercially available Ketek PM 3325 and ON Semi FC 30035 silicon photomultiplier tubes have been used, as well as multipliers from a pilot batch manufactured by OJSC “INTEGRAL” (Republic of Belarus). The paper studies the amplitude distribution of voltage pulses, formed on the load resistor of silicon photoelectronic multipliers by the photocurrent for various values of the energy exposure of optical pulses. The range of values of the energy exposure of optical pulses was determined at which the amplitude distributions of these pulses have pronounced peaks. It was found out that with increasing energy exposure of the optical pulse, part of the peaks disappears. It was established that all the dependencies of the average amplitude of such pulses on the magnitude of the energy exposure of the optical pulse for silicon photomultiplier tubes have a linear section. The performed experimental studies showed that an increase in the energy exposure of optical pulses results in an increase in the dispersion of the amplitude distribution of pulses. It was found that for a linear dependence of the energy exposure of the optical pulse on the optical pulse duration in the range from 50 ns to 1 μs, the studied silicon photoelectronic

multipliers formed voltage pulses of 1 μ s duration with the same rising and falling edges. In this case, the average amplitude of these pulses had a linear dependence on the duration of the optical pulse. The results can be used in design of photodetector devices for monitoring the level of ionization radiation for nuclear power plants, for quantum information systems and in optical communications for transmitting information with monitoring the presence of information leakage channels.

Keywords: amplitude distribution, silicon photoelectron multiplier, intensity of detected optical radiation, duration of optical pulses

For citation: Asayonak M. A., Zenevich A. O., Novikau Ya. V., Saroca S. A. Influence of optical radiation parameters on the amplitude characteristics of silicon photoelectron multipliers. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 104–109 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-104-109>

Введение. В настоящее время для регистрации оптического излучения в широком диапазоне интенсивности видимой и ближней инфракрасной области спектра часто используются кремниевые фотоэлектронные умножители [1, 2]. Эти фотоприемники имеют достаточно низкое напряжение питания, высокую чувствительность в видимой и ближней инфракрасной области спектра, большие коэффициенты усиления, превосходя по ряду параметров обычные фотоэлектронные умножители и лавинные фотодиоды.

Кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ) являются многоэлементными детекторами, представляющими собой матрицу фотоприемников. Каждый элемент матрицы (пиксел) представляет из себя фотодиод. Все фотодиоды матрицы включены параллельно и работают на общую нагрузку [1].

Работа Si-ФЭУ основана на том, что в каждом p - n -переходе может быть создан токовой импульс, вызванный микроплазменным пробоем перехода. К появлению микроплазменного пробоя p - n -перехода может привести фото- или термогенерированный свободный носитель электрического заряда. При одновременном поглощении фотонов в разных p - n -переходах в каждом из них будет возникать сигнал в виде токового импульса. В результате выходной сигнал Si-ФЭУ представляет собой суммарный сигнал всех сработавших при поглощении фотонов p - n -переходов.

В существующих публикациях, посвященных исследованию принципов работы и характеристик этих фотоприемников, отсутствуют сведения о зависимости вида амплитудного распределения импульсов, созданных фототоком Si-ФЭУ, от интенсивности регистрируемого оптического излучения [3–6]. В связи с этим определение таких зависимостей и стало *целью данной работы*.

Описание установки и методики эксперимента. Для проведения исследований авторами данной статьи была создана экспериментальная установка, структура которой представлена на рис. 1.

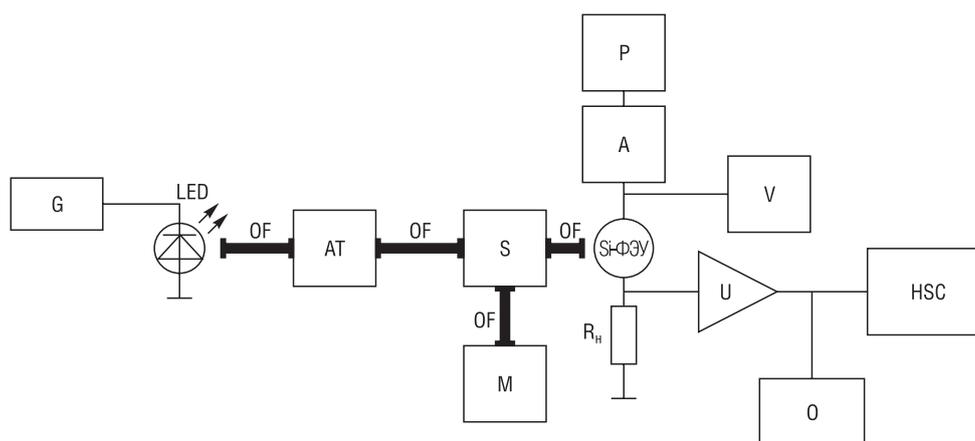


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: G – генератор, LED – светодиод, OF – оптическое волокно, AT – аттенюатор, S – разветвитель, M – измеритель энергетической экспозиции оптических импульсов, A – амперметр, P – источник питания, V – вольтметр, U – широкополосный усилитель, O – осциллограф, HSC – аппаратно-программный комплекс

Fig. 1. Structural diagram of the experimental setup: G – generator, LED – light-emitting diode, OF – optical fiber, AT – attenuator, S – splitter, M – optical pulse energy meter, A – ammeter, P – source of power, V – voltmeter, U – broadband amplifier, O – oscillograph, HSC – hardware and software complex

Источником оптического излучения в экспериментальной установке являлся светодиод с длиной волны 630 нм. Формирование оптических импульсов светодиодом осуществлялось под управлением генератора. Для этого генератор подавал на светодиод электрические импульсы прямоугольной формы с постоянной амплитудой, длительность которых могла изменяться в пределах 0,05–10,0 мкс, а частота следования оставалась неизменной и составляла 10^4 Гц. Для подачи оптического излучения на Si-ФЭУ использовались отрезки оптического волокна. Через первый отрезок оптического волокна и аттенюатор оптические импульсы светодиода попадали на разветвитель, который разделял оптическое излучение таким образом, что 50 % этого излучения поступало на Si-ФЭУ, а 50 % – на измеритель энергетической экспозиции оптических импульсов. Аттенюатор использовался для ослабления энергетической экспозиции оптических импульсов.

От источника питания на Si-ФЭУ подавалось постоянное напряжение питания $U_{\text{п}}$. Для контроля напряжения питания Si-ФЭУ использовался вольтметр.

Под воздействием оптических импульсов в Si-ФЭУ формировались электрические импульсы фототока. Они вызывали или стимулировали изменение падения напряжения на нагрузочном резисторе $R_{\text{н}} = 1$ кОм и формирование на нем импульсов напряжения. Затем импульсы напряжения усиливались широкополосным усилителем с полосой пропускания до 1 ГГц и подавались на вход аппаратно-программного комплекса. Аппаратно-программный комплекс создан на основе компьютера с быстродействующим аналого-цифровым преобразователем. Этот комплекс выполняет регистрацию амплитудных распределений импульсов напряжения (АРИ), поступающих на его вход.

Величина электрического тока, протекающего через Si-ФЭУ, измерялась при помощи амперметра. Амплитуда, длительность и частота следования импульсов контролировались при помощи осциллографа, подключенного к выходу усилителя.

Исследования выполнялись при постоянной температуре окружающей среды 293 К. Поскольку исследуемые Si-ФЭУ имели различные напряжения пробоя $U_{\text{пр}}$, то для сравнения их амплитудных характеристик между собой использовалась величина перенапряжения, рассчитываемая следующим образом: $\Delta U = U_{\text{п}} - U_{\text{пр}}$.

Результаты эксперимента и их обсуждение. В качестве объектов исследования использовались серийно выпускаемые кремниевые фотоэлектронные умножители Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035, а также умножители из опытной партии, произведенной ОАО «ИНТЕГРАЛ» (Республика Беларусь). Напряжения пробоя для исследуемых Si-ФЭУ составляли: $U_{\text{пр}} = 27,0$ В для Кетек РМ 3325; $U_{\text{пр}} = 24,7$ В для ON Semi FC 30035; $U_{\text{пр}} = 37,5$ В для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Исследования выполнены для напряжений питания, при которых отношение сигнал/шум имело максимальное значение для каждого типа фотоумножителей и определялось по методике, описанной в [5].

Перенапряжения, для которых это отношение было максимальным, соответствовали следующим значениям: $\Delta U = 0,30$ В для Кетек РМ 3325; $\Delta U = 0,25$ В для ON Semi FC 30035; $\Delta U = 0$ В для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Проведенные исследования позволили определить вид зависимости амплитудного распределения выходных импульсов фотоумножителей от величины энергетической экспозиции оптических импульсов. На рис. 2 приведены результаты для Si-ФЭУ марки Кетек РМ 3325, так как эти результаты являются характерными для всех кремниевых фотоэлектронных умножителей, изученных в ходе описываемого в данной статье эксперимента.

Наименьшее значение энергетической экспозиции, при которой в исследуемых Si-ФЭУ формировались электрические импульсы, для умножителей было приблизительно одинаковым и составляло $H = 1,14 \cdot 10^{-8}$ Дж/см².

Как видно из полученных результатов, увеличение энергетической экспозиции оптических импульсов в диапазоне от $1,14 \cdot 10^{-8}$ до $2,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² приводит к появлению ярко выраженных максимумов АРИ (см. рис. 2, а). Дальнейшее возрастание величины H обуславливает изменение вида АРИ и увеличение количества максимумов, как это показано на рис. 2, б. При дальнейшем росте энергетической экспозиции оптических импульсов наблюдалось исчезновение части максимумов (рис. 2, в). Такое поведение амплитудных распределений импульсов Si-ФЭУ, по всей видимости, связано с увеличением числа одновременно сработавших пикселей, а также проявлением межпиксельных оптических взаимодействий и ростом дисперсии коэффициента усиления одного

пиксела при повышении энергетической экспозиции оптического импульса.

Полученные нами зависимости средней амплитуды импульсов A_{cp} от H представлены на рис. 3. Все зависимости имели линейный участок, на котором A_{cp} увеличивается прямо пропорционально росту H . Такой диапазон линейности для всех исследуемых Si-ФЭУ соответствовал $H = (1,14-2,40) \cdot 10^{-8}$ Дж/см². Отметим, что при $H < 1,14 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² оптические импульсы Si-ФЭУ не приводили к появлению импульса-отклика.

Дальнейшее увеличение энергетической экспозиции оптического импульса обуславливает отклонение зависимостей A_{cp} от H от линейной. При значениях $H \geq 4,50 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» средняя амплитуда импульсов A_{cp} прекращала рост. Для других марок исследуемых Si-ФЭУ в диапазоне $H = (2,4-6,0) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² наблюдался небольшой рост величины A_{cp} . Такое поведение зависимостей A_{cp} от H при $H > 2,6 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² связано с тем, что при этих значениях энергетической экспозиции оптических импульсов наблюдается уменьшение коэффициента усиления фототока. Данный эффект наблюдался нами при исследовании коэффициента усиления фототока Si-ФЭУ [7]. Появление эффекта связано с ростом числа фотогенерированных свободных носителей заряда с увеличением H . При определенных значениях энергетической экспозиции оптических импульсов фотогенерированные свободные носители заряда приводят к значительному уменьшению напряженности электрического поля в областях умножения электрического заряда Si-ФЭУ. Это влечет уменьшение коэффициента умножения фототока.

Значения средней амплитуды импульсов при $H = (1,14-2,40) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² были приблизительно одинаковыми для всех исследуемых Si-ФЭУ. В диапазоне $H = (2,4-6,0) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² наибольшую амплитуду имели Si-ФЭУ Кетек РМ 3325, а наименьшую – Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ».

Увеличение энергетической экспозиции оптического импульса приводило к увеличению дисперсии амплитудного распределения импульсов D , о чем свидетельствуют полученные нами зависимости D от H , представленные на рис. 4.

Отметим, что для Si-ФЭУ Кетек РМ 3325 значение D имело наибольшее значение во всем исследуемом диапазоне величин H по сравнению с другими марками Si-ФЭУ. Также для данных умножителей наблюдалась линейная зависимость дисперсии амплитудного распределения импульсов от энергетической экспозиции оптического импульса. Для других марок Si-ФЭУ такая зависимость D от H не установлена (см. рис. 4). При значениях энергетической экспозиции оптического импульса $H = (1,14-2,40) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² дисперсия амплитудного распределения Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ» изменялась незначительно. Необходимо отметить, что данный диапазон соответствовал линейной зависимости A_{cp} от H .

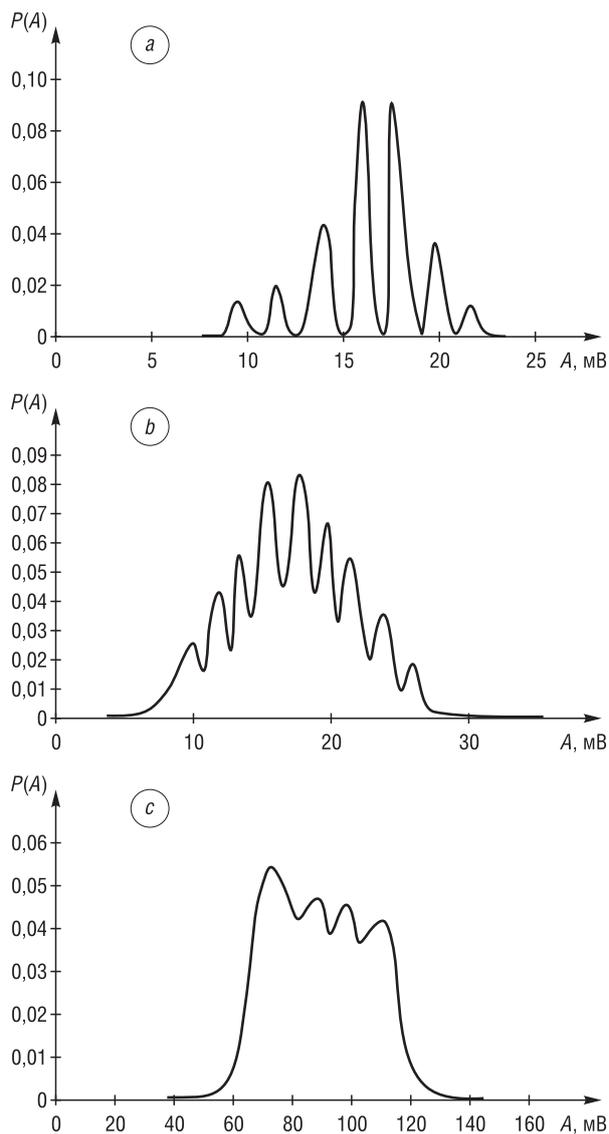


Рис. 2. Амплитудные распределения импульсов Si-ФЭУ: a – энергетическая экспозиция оптических импульсов $H = 1,91 \cdot 10^{-8}$ Дж/см², b – $H = 2,67 \cdot 10^{-8}$ Дж/см², c – $H = 3,96 \cdot 10^{-8}$ Дж/см²

Fig. 2. Amplitude distributions of Si-PMT pulses: a – energy exposure of optical pulses $H = 1.91 \cdot 10^{-8}$ J/cm², b – $H = 2.67 \cdot 10^{-8}$ J/cm², c – $H = 3.96 \cdot 10^{-8}$ J/cm²

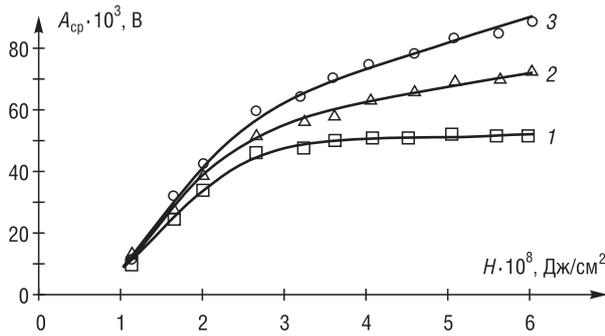


Рис. 3. Зависимость средней амплитуды от энергетической экспозиции при $\Delta U = 0,3$ В: 1 – Si-ФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ», 2 – ON Semi FC 30035, 3 – Ketek PM 3325

Fig. 3. The dependence of the average amplitude on the energy exposure at $\Delta U = 0.3$ V: 1 – Si-PEM OJSC “INTEGRAL”, 2 – ON Semi FC 30035, 3 – Ketek PM 3325

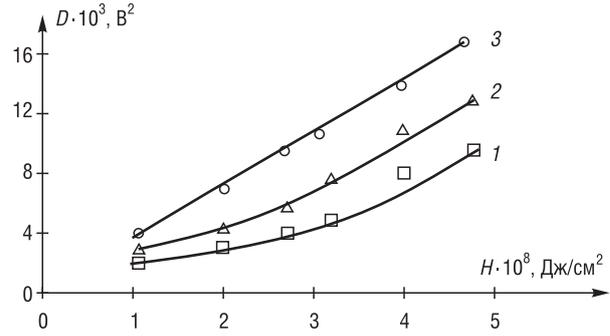


Рис. 4. Зависимость дисперсии от энергетической экспозиции при перенапряжении $\Delta U = 0,3$ В: 1 – Si-ФЭУ ОАО «ИНТЕГРАЛ», 2 – ON Semi FC 30035, 3 – Ketek PM 3325

Fig. 4. Dependence of dispersion on energy exposure during overvoltage $\Delta U = 0.3$ V: 1 – Si-PEM OJSC “INTEGRAL”, 2 – ON Semi FC 30035, 3 – Ketek PM 3325

В процессе выполнения исследований было установлено, что в случае линейной зависимости энергетической экспозиции оптического импульса от длительности оптического импульса τ в диапазоне от 0,05 до 1,00 мкс исследуемые Si-ФЭУ формировали на нагрузочном резисторе R_n импульсы напряжения длительностью 1,00 мкс с одинаковыми фронтом нарастания 0,10 мкс и фронтом спада 0,50 мкс. При этом средняя амплитуда этих импульсов имела линейную зависимость от величины τ . Для $\tau > 1,00$ мкс длительность электрических импульсов начинает соответствовать длительности оптических импульсов, а их амплитуда не изменяется.

Для оценки зависимости A_{cp} от τ использовалась величина $\Delta A_{cp}/\Delta\tau$, где ΔA_{cp} – изменение средней амплитуды импульсов Si-ФЭУ в диапазоне $\tau = 0,05$ –1,00 мкс, $\Delta\tau$ – изменение длительности оптического импульса в этом же диапазоне. Так, для интенсивности оптического излучения $I = 1,9 \cdot 10^{-2}$ Вт/см² значения были следующими: $\Delta A_{cp}/\Delta\tau = 3 \cdot 10^5$ В/с для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ»; $\Delta A_{cp}/\Delta\tau = 1 \cdot 10^5$ В/с для ON Semi FC 30 035; $\Delta A_{cp}/\Delta\tau = 2 \cdot 10^5$ В/с для Ketek PM 3325. Отметим, что энергетическая экспозиция оптических импульсов определялась по формуле $H = I \cdot \tau$. Наиболее сильная зависимость A_{cp} от τ наблюдалась для Si-ФЭУ производства ОАО «ИНТЕГРАЛ», а наименьшая – для ON Semi FC 30 035.

Заключение. Показано, что при значениях энергетической экспозиции оптического импульса в диапазоне от $1,14 \cdot 10^{-8}$ до $2,00 \cdot 10^{-8}$ Дж/см² амплитудные распределения импульсов напряжения, сформированных на нагрузочном резисторе кремниевых фотоэлектронных умножителей, имеют ярко выраженные пики. С увеличением энергетической экспозиции оптического импульса часть пиков исчезает.

Установлено, что в диапазоне энергетической экспозиции оптического импульса $H = (1,14$ – $2,60) \cdot 10^{-8}$ Дж/см² средняя амплитуда импульсов напряжения, сформированных на нагрузочном резисторе кремниевых фотоэлектронных умножителей, увеличивается прямо пропорционально росту энергетической экспозиции для всех исследуемых кремниевых фотоэлектронных умножителей.

Определено, что рост энергетической экспозиции оптического импульса приводит к увеличению дисперсии амплитудного распределения импульсов.

Получено, что в случае линейной зависимости энергетической экспозиции оптического импульса от длительности оптического импульса в диапазоне от 0,05 до 1,00 мкс исследуемые кремниевые фотоэлектронные умножители формировали на нагрузочном резисторе импульсы напряжения длительностью 1,00 мкс, при этом средняя амплитуда этих импульсов имела линейную зависимость от длительности оптического импульса τ .

Полученные результаты могут найти применение при проектировании фотоприемных устройств контроля уровня ионизирующего излучения для атомных электростанций, для квантовых информационных систем и в оптической связи при передаче информации с контролем наличия каналов утечки информации.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор № 18А3-014).

Acknowledgments

This work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research (Agreement No. T18A3-014).

Список использованных источников

1. Гулаков, И. Р. Фотоприемники квантовых систем / И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.
2. Development of a solid-state photomultiplier based on an array of Geiger mode CMOS avalanche photodiodes / W. G. Lawrence [et al.] // Proc. of SPIE. Semiconductor Photodetectors III / M. J. Cohen, E. L. Dereniak. – 2006. – Vol. 6119. – 10 p. <https://doi.org/10.1117/12.644917>
3. Твердотельный электронный умножитель многоцелевого назначения на основе гейгеровских микроячеек / Е. А. Георгиевская [и др.] // Приклад. физика. – 2003. – № 2. – С. 123–128.
4. Вероятностное распределение и шум-фактор сигналов твердотельных фотоэлектронных умножителей с учетом процессов кросс-толлка / С. Л. Виноградов [и др.] // Краткие сообщения по физике. – 2009. – № 9. – С. 3–13.
5. Асаёнок, М. А. Исследование характеристик кремниевых фотоэлектронных умножителей / М. А. Асаёнок, А. О. Зеневич // Приклад. физика. – 2018. – № 6. – С. 49–53.
6. Высокочувствительные микропиксельные лавинные фотодиоды для сцинтилляционных счетчиков нейтринного эксперимента T2K / Ю. В. Мусиенко [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2008. – № 1. – С. 111–118.
7. Асаёнок, М. А. Коэффициент усиления кремниевого фотоэлектронного умножителя с низким напряжением питания / М. А. Асаёнок, О. Ю. Горбадей, А. О. Зеневич // Проблемы инфокоммуникаций. – 2017. – № 2 (6). – С. 82–87.

References

1. Gulakov I. R., Zenevich A. O. *Photodetectors of Quantum Systems*. Minsk, UO VGKS, 2012, 276 p. (in Russian).
2. Lawrence W. G., Stapels C. J., Augustine F. L., Christian J. F. Development of a solid-state photomultiplier based on an array of Geiger mode CMOS avalanche photodiodes. *Proc. of SPIE. Semiconductor Photodetectors III*, 2006, vol. 6119. <https://doi.org/10.1117/12.644917>
3. Georgievskaya E. A., Klemin S. N., Filatov L. A., Buzhan P. Zh., Dolgoshein B. A., Ilyin A. L., Kantserov V. A., Kaplin V. A., Karakash A. I., Pleshko A. D., Popova E. V., Smirnov S. Yu. The solid-state silicon photomultiplier for a wide range of applications. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2003, no. 2, pp. 123–128 (in Russian).
4. Vinogradov S. L., Vinogradova T. R., Shubin V. E., Shushakov D. A. Probabilistic distribution and noise factor of solid state photomultiplier signals, taking into account cross-talk processes. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*, 2009, vol. 36, no. 9, article number: 253. <https://doi.org/10.3103/S1068335609090012>
5. Asayonak M. A., Zenevich A. O. Investigation of the characteristics of silicon photomultipliers. *Prikladnaya fizika = Applied Physics*, 2018, no. 6, pp. 49–53 (in Russian).
6. Musienko Yu. V., Akhrameev E. V., Afanas'ev A. Yu., Bondarenko G. B., Golovin V. M., Gushchin E. N., Ershov N. V., Izmailov A. O., Kudenko Yu. G., Lubsandorzhiev B. K., Mayatskii V. A., Mineev O. V., Khabibullin M. M., Khotyantsev A. N., Shaibonov B. A. M., Shaikhiev A. T. Highly sensitive micropixel avalanche photodiodes for scintillation counters of the T2K neutrino experiment. *Instruments and Experimental Techniques*, 2008, vol. 51, no. 1, pp. 101–107. <https://doi.org/10.1134/S0020441208010119>
7. Asayonak M. A., Gorbadey O. Y., Zenevich A. O. Amplification Factor of Silicon Photoelectronic Multiplier with Low Voltage Supply. *Problemy Infokommunikacij*, 2017, no. 2, pp. 82–87 (in Russian).

Информация об авторах

Асаёнок Марина Анатольевна – аспирант, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.asayonok@bsac.by

Зеневич Андрей Олегович – доктор технических наук, профессор, ректор, Белорусская государственная академия связи (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: a.zenevich@bsac.by

Новиков Евгений Владимирович – кандидат технических наук, доцент, директор, Институт современных технологий связи учреждения образования «Белорусская государственная академия связи» (ул. Ф. Скорины, 8/2, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: e.novikov@bsac.by

Сорока Сергей Александрович – ведущий инженер, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» Национальной академии наук Беларуси (ул. Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: soroca@oelt.basnet.by

Information about the authors

Maryna A. Asayonak – Postgraduate Student, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.asayonok@bsac.by

Andrey O. Zenevich – D. Sc. (Engineering), Professor, Rector, Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: a.zenevich@bsac.by

Yauhen V. Novikau – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Director, Institute of Modern Communication Technologies of the Belarusian State Academy of Communications (8/2, F. Skorina Str., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: e.novikov@bsac.by

Syargey A. Saroka – Leading Engineer, State Scientific-Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology” of the National Academy of Sciences of Belarus (22, Logoiskij tract, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: soroca@oelt.basnet.by

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

УДК 004.031 : 37.072

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-110-116>

Поступила в редакцию 05.12.2019

Received 05.12.2019

А. В. Решетняк¹, В. И. Дравица^{1,2}

¹Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Межотраслевой научно-практический центр систем идентификации и электронных деловых операций» Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

²Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

КОМПЛЕКСНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ И РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РЕЕСТРОВ ДЛЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ УСЛУГ НА ОСНОВЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ДОКУМЕНТОВ

Аннотация. Рассмотрены возможности комплексного применения технологий идентификации и распределенных реестров (Distributed Ledger Technology, DLT) для повышения эффективности оказания электронных услуг на базе многофункциональных интеллектуальных документов на примере студенческих билетов. Дана оценка основным преимуществам и недостаткам действующих в Беларуси систем эмиссии интеллектуальных документов в системе образования, в том числе: централизованной (проект «Карта учащегося») и децентрализованной (электронный студенческий билет). Обосновано предложение использования DLT-модели для решения задачи выпуска многофункциональных электронных студенческих билетов, совмещенных с банковской платежной карточкой, которая позволяет реализовать новые функциональные возможности в оказании электронных услуг и обладает рядом преимуществ по отношению к действующим системам изготовления электронных документов учащихся. Описаны возможности использования открытого блокчейна (Public Blockchain) и корпоративного, или закрытого, блокчейна (Private Blockchain) для осуществления выпуска и контроля интеллектуальных документов, ускоренного развития электронных услуг, предоставляемых на основе «Умного контракта» (Smart Contract), а также использования технологии Smart Contract для содействия добросовестной конкуренции поставщиков электронных услуг. Предложена методика оценки рейтинга поставщика электронных услуг на основе весового коэффициента «полезности» или «востребованности». Приведена информация об ожидаемых эффектах внедрения предложенной DLT-модели за счет комплексного использования технологий идентификации и распределенных реестров.

Ключевые слова: автоматическая идентификация, распределенные реестры, блокчейн, многофункциональные интеллектуальные документы, электронные услуги

Для цитирования: Решетняк, А. В. Комплексное использование технологий идентификации и распределенных реестров для развития электронных услуг на основе многофункциональных интеллектуальных документов / А. В. Решетняк, В. И. Дравица // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 110–116. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-110-116>

Alexander V. Reshetniak¹, Victor I. Dravitsa^{1,2}

¹Scientific & Engineering Republican Unitary Enterprise “Interbranches Research & Development Centre for Identification Systems and e-Business Operations” of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

COMPREHENSIVE USE OF IDENTIFICATION TECHNOLOGIES AND DISTRIBUTED LEDGER TECHNOLOGY FOR THE DEVELOPMENT OF ELECTRONIC SERVICES PROVIDED THROUGH MULTI-PURPOSE SMART DOCUMENTS

Abstract. The article covers the possibilities of comprehensive use of identification technologies and Distributed Ledger Technology (DLT) for increasing the efficiency of electronic services provided through multi-purpose student cards. The main advantages and disadvantages of the existing intellectual document emission systems in the Belarusian education system are as-

sessed, including: centralized (the “Student Card” project) and decentralized (the electronic student card) ones. The proposal to use the DLT-model for issuing multi-purpose electronic student cards combined with bank payment cards has been grounded. Such model makes it possible to implement new functional capabilities when providing electronic services and has a number of advantages over the existing systems of electronic student documents issuance. The article describes how Public Blockchain and Private Blockchain can be used to issue and control intellectual documents, to accelerate the development of the electronic services provided through Smart Contract, and how the Smart Contract technology can be used to promote fair competition among electronic services providers. The methodology of evaluating the electronic services provider rating basing on the weighting factor of “usefulness” or “being in demand” is proposed. The article provides information on the expected effects of the proposed DLT-model implementation, obtained through the comprehensive use of identification technologies and distributed ledger technology.

Keywords: auto-ID technologies, distributed ledger technology, blockchain, multifunctional smart cards, multi-purpose smart documents, electronic services

For citation: Reshetniak A. V., Dravitsa V. I. Comprehensive use of identification technologies and distributed ledger technology for the development of electronic services provided through multi-purpose smart documents. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 110–116 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-110-116>

Введение. Активное использование технологий идентификации в настоящее время получает новый толчок развития в связи с популяризацией и внедрением усовершенствованных технологий распределенных реестров (Distributed Ledger Technology, DLT) и блокчейн (Blockchain) – как частного случая DLT.

Новые возможности, которые открываются перед организациями, внедряющими эти решения для автоматизации бизнес-процессов, заключаются в синергетическом эффекте слияния технологий идентификации, которые отвечают на вопросы «что?», «где?», «когда?», «каково состояние маркированного объекта?», и технологий распределенных реестров, которые позволяют подтвердить достоверность события и его участников, авторизованных в информационной сети. Указанные технологии предоставляют возможность оперировать комплексной (полной) и гарантированной информацией о маркированных объектах, соответственно обеспечить внедрение новых логистических алгоритмов, оптимизировать весь комплекс бизнес-процессов, сократить затраты на документарное сопровождение и дополнительные посреднические издержки бизнес-процессов. Одновременно предлагаемые подходы способствуют решению задач интеграции разнородных автоматизированных систем.

Активное развитие упомянутых технологий в ближайшее время позволит обеспечить цифровую трансформацию широкого круга задач, процессов и бизнесов: торговля, логистика, транспорт, образование, банковские операции, мобильные платежи и сервисы, юридические и нотариальные операции, здравоохранение, недвижимость, индустрия развлечений и многие другие.

Отметим, что невзирая на активное развитие мобильных технологий идентификации и блокчейн, ряд аналитических материалов, ежегодно публикуемых ведущими международными компаниями, демонстрирует сохранение интереса к использованию смарт-карт. Так, по оценкам аналитического агентства Transparency Market Research, опубликованным в январе 2018 г., глобальный рынок смарт-карт в 2016 г. оценивался в 8,5 млрд долл. США, при этом с учетом развития технологий, а также оценок данных, полученных за прошедший период, ожидается, что объем рынка смарт-карт к концу 2023 г. составит 14,1 млрд долл. США. Этот анализ проводится на основании критерия CAGR (Compound Annual Growth Rate), соответствующего среднегодовому темпу роста в течение периода более одного года [1]. В приведенной оценке критерий CAGR означает, что объем выручки на рынке смарт-карт ежегодно будет расти на 7,4 %.

Одним из ключевых факторов, способствующих активному развитию рынка смарт-карт, является критерий безопасности, защиты информации. Эволюция от платежных карт с магнитной полосой к EMV-картам (EMV – Europay, MasterCard, VISA – международный стандарт для операций по банковским картам с бесконтактным чипом), развитие NFC (Near Field Communication – технология беспроводной передачи данных), чипов с дуальным интерфейсом, смарт-карт с функциями хранения биометрических идентификаторов непосредственно в памяти чипа карты позволяют уверенно говорить о том, что востребованность смарт-карт будет наблюдаться достаточно продолжительное время, невзирая на развитие других технологий идентификации.

С точки зрения безопасной аутентификации и сохранения прав пользователя, представляет интерес отчет компании Secure Technology Alliance, опубликованный в марте 2017 г. Материалы

демонстрируют, что интеграция смарт-карт и блокчейн позволяет сформировать дополнительные надежные барьеры для защиты данных и интересов пользователей [2].

DLT-модель. В настоящей статье авторами рассматривается DLT-модель, которая представляет собой частный случай синергии технологий идентификации и распределенных реестров на примере многофункциональных интеллектуальных документов, реализуемых на основе смарт-карт (электронных идентификационных документов) в системе образования.

При решении практических задач внедрения многофункциональных интеллектуальных документов в системе образования Республики Беларусь в настоящее время применяется один из вариантов построения системы эмиссии: централизованная (проект «Карта учащегося») или децентрализованная (электронный студенческий билет).

Централизованная система эмиссии предполагает обработку информации одним оператором (центром эмиссии) и изготовление документов одним эмитентом. База данных выданных документов является общей для всех участников системы, решения для построения централизованной системы эмиссии относительно просты в части технической реализации. Такие подходы применены и апробированы в рамках проекта «Карта учащегося», внедряемого в системе общего среднего образования. Алгоритм взаимодействия участников системы представлен на рис. 1.

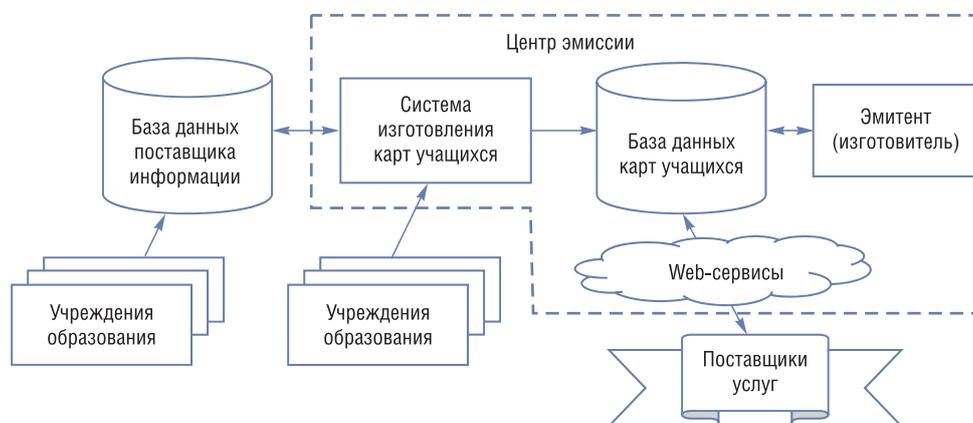


Рис. 1. Централизованная схема эмиссии карт учащихся

Fig. 1. Centralized scheme of student card (for schools) issuance

Как видно из представленной схемы взаимодействия, ведение базы данных осуществляется учреждениями образования в удаленном режиме. База данных с информацией об учащихся и база данных карт учащихся синхронизированы и представляют собой единый информационный ресурс, формируемый либо с участием поставщика информации (агрегатора данных), либо непосредственно учреждениями образования.

Преимуществом централизованной схемы эмиссии является возможность подключения неограниченного количества поставщиков электронных услуг с использованием web-сервисов, обеспечивающих подтверждение легальности электронных идентификационных документов на различных уровнях взаимодействия.

Вместе с тем централизованная система имеет ряд недостатков, основными из которых являются: взаимодействие только с одним эмитентом документов; значительные трудозатраты при формировании базы данных учащихся, что связано с обработкой, периодической актуализацией и верификацией информации, поступающей от различных абонентов (в данном случае – от учреждений образования); затраты на обеспечение защиты информации.

Децентрализованная схема эмиссии предполагает наличие нескольких баз данных об учащихся, нескольких эмитентов документов. Примером такого решения является система изготовления студенческих билетов, действующая в настоящее время (по состоянию на апрель 2019 г.) в Республике Беларусь. Базы данных о студентах и выданных студенческих билетах ведутся каждым вузом самостоятельно. Гарантией достоверности выдаваемых документов выступает бланк строгой отчетности, используемый для изготовления студенческих билетов. Значительными недостатками децентрализованной схемы эмиссии являются следующие: применение электронных

идентификационных документов возможно только на локальном уровне – в пределах вуза, отсутствует возможность реализации web-сервисов и услуг «Умного города» для взаимодействия с поставщиками услуг за пределами высшего учебного заведения.

Синергия электронных идентификационных документов и DLT позволяет реализовать смешанную схему эмиссии с сохранением преимуществ централизованной и децентрализованной схем. В этом случае DLT-схема эмиссии на примере системы изготовления студенческих билетов может быть представлена следующим алгоритмом взаимодействия (рис. 2).

Предлагаемая модель включает в себя клиента (учащийся, студент, другой участник образовательного процесса) и поставщика электронной услуги, которые объединяются в открытый блокчейн (Public Blockchain).

Базисом информационного взаимодействия является корпоративный, или закрытый, блокчейн (Private Blockchain). Корпоративный блокчейн содержит распределенный реестр данных и событий (в данном случае – это база данных о документах об образовании), формируемый учреждениями образования. Взаимодействие участников Public Blockchain и Private Blockchain осуществляется на основе «Умного контракта» (Smart Contract), который определяет и контролирует условия выполнения заказа клиента поставщиком электронной услуги.

Отличительной особенностью предлагаемой схемы взаимодействия является функция формирования рейтинга поставщика электронной услуги, который стимулирует повышение качества предоставляемых клиентам электронных услуг и непосредственно задействован в алгоритме смарт-контракта. Поскольку поставщиков услуг, как правило, несколько, клиент имеет возможность выбрать поставщика с более высоким рейтингом предоставления заказываемых услуг. Таким образом, одним из условий выполнения контракта является оценка рейтинга каждого из возможных поставщиков.

Существует несколько методик построения моделей. Подход в методике, изложенной в [3], интересен тем, что построен на оценке весового коэффициента «полезности» или «востребованности», который использован для оценки рейтинга поставщика электронных услуг.

Для разработанной DLT-модели запишем весовой коэффициент для поставщика услуг в следующем виде:

$$W_{u,v} = \frac{S_{u,v}}{\sum_{u=1, v=1}^{n,m} S_{u,v}} P_v, \quad (1)$$

где $S_{u,v}$ – число, показывающее сколько раз данный поставщик v выполнял заказываемую услугу для u клиентов; P_v – некоторое выражение (в простейшем виде число), подтверждающее надежность поставщика, может быть представлено отношением числового показателя количества успешно выполненных смарт-контрактов к общему количеству заключенных им сделок.

Общую оценку рейтинга поставщика услуги представим следующим выражением:

$$R(v) = \sum_{u=1}^n W_{u,v}. \quad (2)$$

Оценка рейтинга поставщика электронной услуги в общем случае зависит от специфики и характера самой услуги. Если это финансовая услуга (например, оплата за проезд, доступ в Интернет, кредитные операции и др.), то в качестве критерия оценки рекомендовано использовать ликвидность баланса [3]. В этом случае, если принять количество полученных поставщиком v активов по результатам выполнения смарт-контрактов за x , а количество обязательств по смарт-контрактам – за y , выражение, связывающее x и y , будет выглядеть следующим образом [3]:

$$f(x, y) = (x + y) \exp \left[-2 \sin^2 \left(\frac{\pi}{4} - \operatorname{atan} \left(\frac{y}{x} \right) \right) \right]. \quad (3)$$

Построенный в среде MatLab график функции $f(x, y)$ представлен на рис. 3.

Из приведенных выражения (3) и графика функции следует, что наибольшее значение $f(x, y)$ принимает при $x = y$, то есть минимальным требованием при оценке рейтинга поставщика является равенство числа поступивших от клиента заказов числу выполненных поставщиком электронных услуг. Таким образом, функция $f(x, y)$ является функцией полезности или надежности

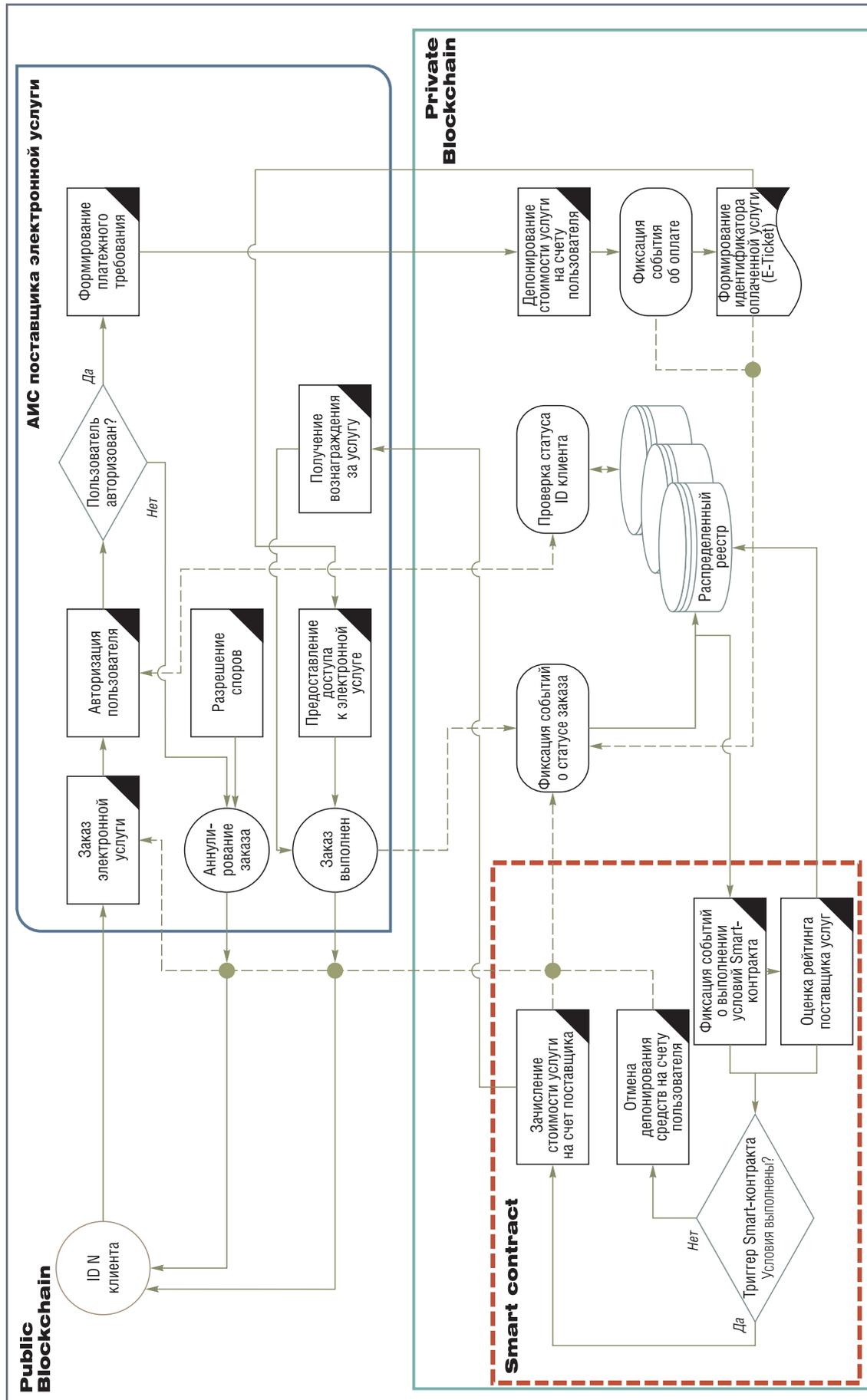
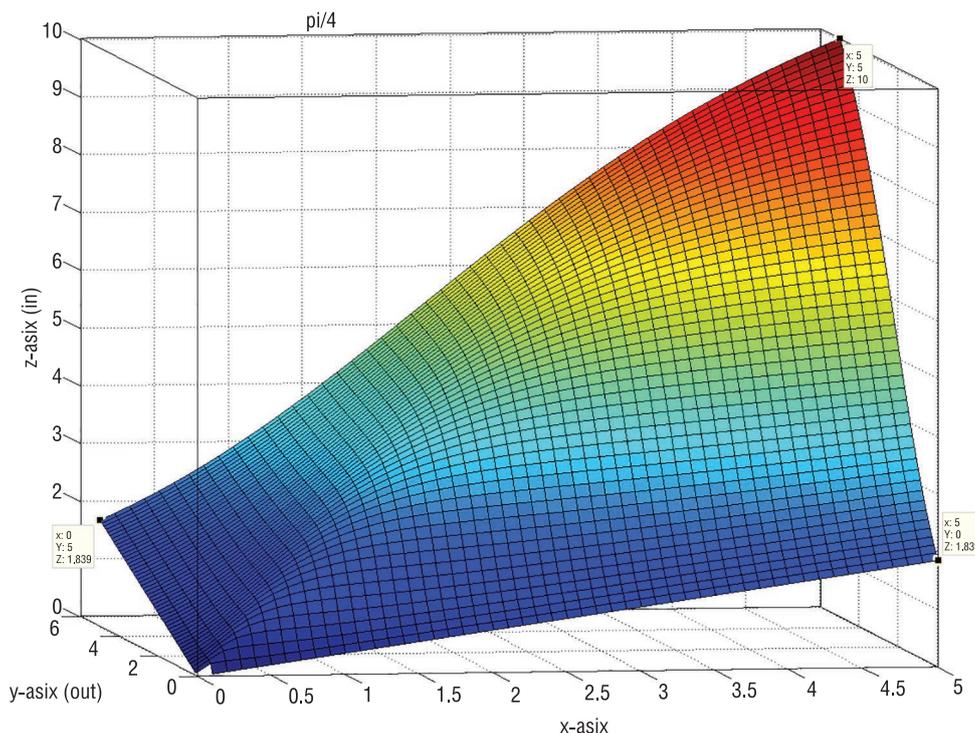


Рис. 2. Предлагаемая к реализации схема взаимодействия для изготовления студенческих билетов
 Fig. 2. Interaction scheme of student cards (for higher education) production proposed for implementation

Рис. 3. График функции $f(x, y)$ Fig. 3. Graph of function $f(x, y)$

поставщика. Для разных предметных областей она может вычисляться по-разному, но по своей сути она соответствует изображенной на рис. 3.

Функция $f(x, y)$ нелинейная, и только при больших значениях x и y наблюдается некоторая линеаризация – вблизи максимума $f(x, y)$.

Заключение. Разработанная DLT-модель предоставляет следующие возможности:

- 1) создание в системе образования платформы, построенной с применением DLT-технологий, что в дальнейшем позволит развивать на этой основе другие современные электронные услуги, в том числе и финансовые;
- 2) внедрение системы изготовления и выдачи многофункциональных электронных документов системы образования, которая может быть тиражирована в других сферах деятельности (например, для корпоративного применения). При этом формируются необходимые условия для оперативного сопровождения общереспубликанских баз данных об обучающихся;
- 3) снижение финансовых затрат на изготовление идентификационных документов системы образования и повышение эффективности трудозатрат учреждений образования за счет перехода на документы, совмещенные с банковской платежной картой;
- 4) формирование необходимых условий для развития электронных услуг с механизмом оценки рейтинга поставщиков услуг, способствующим добросовестной конкуренции;
- 5) реализация и развитие новых электронных услуг, предоставляемых на основе электронных идентификационных документов, ввиду высокой надежности данных, с которыми оперируют участники модели;
- 6) построенный на основе предложенной DLT-модели распределенный информационный ресурс о действующих студенческих билетах обладает всеми преимуществами централизованной схемы эмиссии при более высокой степени достоверности фиксируемых событий;
- 7) предоставление поставщикам электронных услуг типовых решений для информационного взаимодействия с минимальными затратами на их имплементацию в действующие бизнес-процессы;
- 8) формирование условий для добросовестной конкуренции за счет оценки рейтинга поставщиков электронных услуг, а также стимулирования снижения цен на предоставляемые клиентам электронные услуги.

Список использованных источников

1. Smart Cards Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2016–2023 [Electronic resource] // Analytical report of the company Transparency Market Research. – Mode of access: <https://www.transparencymarketresearch.com/smart-card.html> – Date of access: 04.04.2018.
2. Blockchain and Smart Card Technology, Version 1.0, March 2017 [Electronic resource] // Secure Technology Alliance payments council white paper. – Mode of access: <https://www.securetechalliance.org/publications-blockchain-and-smart-card-technology/> – Date of access: 04.05.2018.
3. Details on the Smart Contract Ranking Algorithm [Electronic resource]. – Mode of access: <https://medium.com/nebulasio> – Date of access: 27.12.2018.

References

1. Smart Cards Market – Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2016–2023. *Analytical report of the company Transparency Market Research*. Available at: <https://www.transparencymarketresearch.com/smart-card.html> (accessed 04 April 2018).
2. Blockchain and Smart Card Technology, Version 1.0, March 2017. *Secure Technology Alliance payments council white paper*. Available at: <https://www.securetechalliance.org/publications-blockchain-and-smart-card-technology/> (accessed 04 May 2018).
3. *Details on the Smart Contract Ranking Algorithm*. Available at: <https://medium.com/nebulasio> (accessed 27 December 2018).

Информация об авторах

Решетняк Александр Витальевич – соискатель, заместитель технического директора, Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Межотраслевой научно-практический центр систем идентификации и электронных деловых операций» Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15/2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: rav@ids.by

Дравица Виктор Иванович – кандидат физико-математических наук, доцент, директор, Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие «Межотраслевой научно-практический центр систем идентификации и электронных деловых операций» Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15/2, 220072, Минск, Республика Беларусь); Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vdravitsa@ids.by

Information about the authors

Alexander V. Reshetniak – Postgraduate Student, Deputy Technical Director, Scientific & Engineering Republican Unitary Enterprise “Interbranches Research & Development Centre for Identification Systems and e-Business Operations” of the National Academy of Sciences of Belarus (15/2, Academicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: rav@ids.by

Victor I. Dravitsa – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Director, Scientific & Engineering Republican Unitary Enterprise “Interbranches Research & Development Centre for Identification Systems and e-Business Operations” of the National Academy of Sciences of Belarus (15/2, Academicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus); Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vdravitsa@ids.by

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
УДК 623.618.5
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-117-128>

Поступила в редакцию 30.01.2019
Received 30.01.2019

С. В. Кругликов¹, А. Ю. Зализко²

¹*Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

²*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

СИНТЕЗ БЕСПРОВОДНОЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННОЙ СЕТИ С АДАПТАЦИЕЙ К ОТКАЗАМ УЗЛОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СРЕДНЕЙ И ВЫСОКОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ

Аннотация. Рассмотрена методика синтеза беспроводной цифровой сети связи с пакетной коммутацией, обеспечивающей передачу видеосообщений реального масштаба времени между элементами многофункциональной информационно-управляющей системы в условиях высокой интенсивности отказов узловых элементов. В качестве концептуальной модели телекоммуникационной сети принята сеть смешанной структуры, которая включает многофункциональные устройства, построенные на основе стандартов широкополосного радиодоступа с коммутацией пакетов и двумя взаимосвязанными уровнями сетевого взаимодействия элементов (локальным и магистральным). Методика синтеза беспроводной сети основывается на многоуровневой комбинированной адаптации телекоммуникационной сети в условиях отказов узловых элементов, основной задачей которой является рациональное изменение параметров, функций сетевых элементов в тесной взаимосвязи с целенаправленным преобразованием структуры подсетей телекоммуникационной системы. Основная цель проведения комбинированной адаптации сети заключается в достижении необходимой пропускной способности системы связи в зависимости от интенсивности отказов узловых элементов. Свойства многоуровневой адаптации исследовались в процессе осуществления комбинированного (структурно-параметрического) синтеза с использованием агрегативного подхода моделирования сложных технических систем. Эффективность указанной методики подтверждается результатами проведенного имитационного эксперимента с использованием ранее полученной агрегативной модели беспроводной сети передачи данных с коммутацией пакетов. Экспериментальные данные, полученные при натурном исследовании сетей широкополосной радиосвязи на основе стандартов 802.11b/g/n, показали, что время обработки пакетов сообщения зависит от использования существующих способов адаптации. В частности, применение эффективных алгоритмов адаптации (как параметрических, так и структурных) позволит сократить время нахождения информационных данных (пакетов) в широкополосных устройствах связи в несколько раз и тем самым обеспечить требуемую пропускную способность сети, функционирующей в условиях отказов узловых элементов.

Ключевые слова: беспроводная телекоммуникационная сеть, коммутация пакетов сообщений, комбинированная адаптация, агрегативная модель, структурно-параметрический синтез, имитационный эксперимент

Для цитирования: Кругликов, С. В. Синтез беспроводной телекоммуникационной сети с адаптацией к отказам узловых элементов средней и высокой интенсивности / С. В. Кругликов, А. Ю. Зализко // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 1. – С. 117–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-117-128>

Sergey V. Kruglikov¹, Aliaksandr Yu. Zalizka²

¹*United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

²*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

SYNTHESIS OF WIRELESS TELECOMMUNICATION NETWORK WITH ADAPTATION TO REFUSALS OF CENTRAL ELEMENTS OF AVERAGE AND HIGH INTENSITY

Abstract. A technique of synthesis of a wireless digital communication network with package switching, providing transfer of video messages of real time scale between elements of multipurpose information-operating system in conditions of high failure rate of central elements, is considered. As conceptual model of a telecommunication network – the network of the mixed structure, including multipurpose devices, constructed on the basis of standards of a broadband radio access with switching of packages and two interconnected levels of network interaction of elements (local and main) is accepted. The technique of synthesis of a wireless network is based on the multilevel, combined adaptation of a telecommunication network in the conditions of refusals of central elements, which primary goal is rational change of parameters, functions of network elements in close interrelation with purposeful transformation of structure of telecommunication system subnetworks. The main objective of carrying out the combined adaptation of the network consists in achievement of necessary throughput of communication system depending on degree of failure rate of central elements. Properties of multilevel adaptation were investigated in the course of realization of the combined (structurally-parametrical) synthesis with use of the aggregate approach of modelling of difficult technical systems. Efficiency of the specified technique is proven by the results of the im-

itating experiment with use of the aggregate model of a wireless network of data transmission with switching of packages, obtained previously. The experimental data, received at natural research of networks of a broadband radio communication on the basis of standards 802.11 b/g/n, have shown, that time of processing of packages of a message essentially depends on use of existing ways of adaptation. In particular, application of effective algorithms of adaptation (both parametrical and structural) will allow to reduce the time of finding of details (packages) in broadband communication devices by several times and, thereby, to provide demanded throughput of the network functioning in the conditions of refusals of central elements.

Keywords: wireless telecommunication network, message packet switching, combined adaptation, aggregative model, structural-parametric synthesis, simulation experiment

For citation: Kruglikov S. V., Zalizka A. Yu. Synthesis of wireless telecommunication network with adaptation to refusals of central elements of average and high intensity. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 1, pp. 117–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-1-117-128>

Введение. Современные беспроводные телекоммуникационные сети (ТКС), входящие в состав информационно-управляющих систем (ИУС), должны обеспечивать достаточно высокую пропускную способность каналов передачи данных и устойчивое функционирование подсистемы связи в условиях внешних (вне сети) преднамеренных пространственных воздействий, приводящих к многочисленным отказам узловых элементов. Для повышения устойчивости ТКС к воздействию различного рода негативных факторов в [1] рассмотрен подход построения системы связи с учетом применения многоуровневой комбинированной адаптации. Согласно выдвинутой гипотезе, представленной в [1], механизм комбинированной адаптации должен включать определенную последовательность параметрических, структурных и функциональных способов (алгоритмов) повышения живучести сети в условиях отказа узловых элементов. В свою очередь многоуровневая адаптация может быть реализована в процессе комбинированного (структурно-параметрического) синтеза с целью достижения максимально возможной пропускной способности ТКС. Подход математического моделирования сложных динамических систем, представленный в [2] и основывающийся на описании беспроводной ТКС с помощью агрегатов [3], применяется в настоящей статье для подтверждения выдвинутой гипотезы.

Концептуальная модель, представленная в [2], ТКС смешанной структуры должна включать абонентские устройства (АУ), беспроводные средства связи с функциями коммутаторов и маршрутизаторов (локальные и магистральные узлы соответственно – узловые элементы ТКС), построенные на основе стандартов широкополосного радиодоступа с коммутацией пакетов и двумя взаимосвязанными уровнями сетевого взаимодействия элементов – локальным и магистральным [3, 4]. Узловые элементы (УЭ) взаимодействуют между собой в составе транспортной составляющей (ТрС) сети посредством широкополосных каналов связи (ШКС). Синтез адаптивной телекоммуникационной сети (АТКС) основывается на проведении математического моделирования агрегативной системы связи с коммутацией пакетов с учетом применения комбинированной адаптации.

Основная цель проведения *комбинированной адаптации ТКС* заключается в достижении необходимой пропускной способности *системы связи* в зависимости от отказов узловых элементов.

В целом методика структурно-параметрического синтеза АТКС представляется в следующем порядке (рис. 1):

1. Определение исходных данных синтеза АТКС.
2. Построение исходной математической модели ТКС без учета отказа УЭ, включающее последовательный структурно-параметрический синтез частных математических моделей сетевых устройств (СУ) в модели подсетей и сети связи в целом (блок формирования математической модели ТКС).
3. С учетом синтезированной модели ТКС проведение анализа ее пропускной способности $\overline{W}_{ТКС}$ при известных данных о пропускных способностях направлений связи между взаимодействующими АУ.
4. При несоответствии значения пропускной способности сети требуемому осуществляется выбор алгоритма адаптации с учетом степени отказов узловых элементов.
5. Корректировка исходных данных для синтеза ТКС при условии превышения потребных ресурсов над имеющимися в ходе проведения адаптации (блок адаптации ТКС к преднамеренным воздействиям).
6. Вывод результатов синтеза ТКС в виде параметров СУ и характеристик структур подсетей.

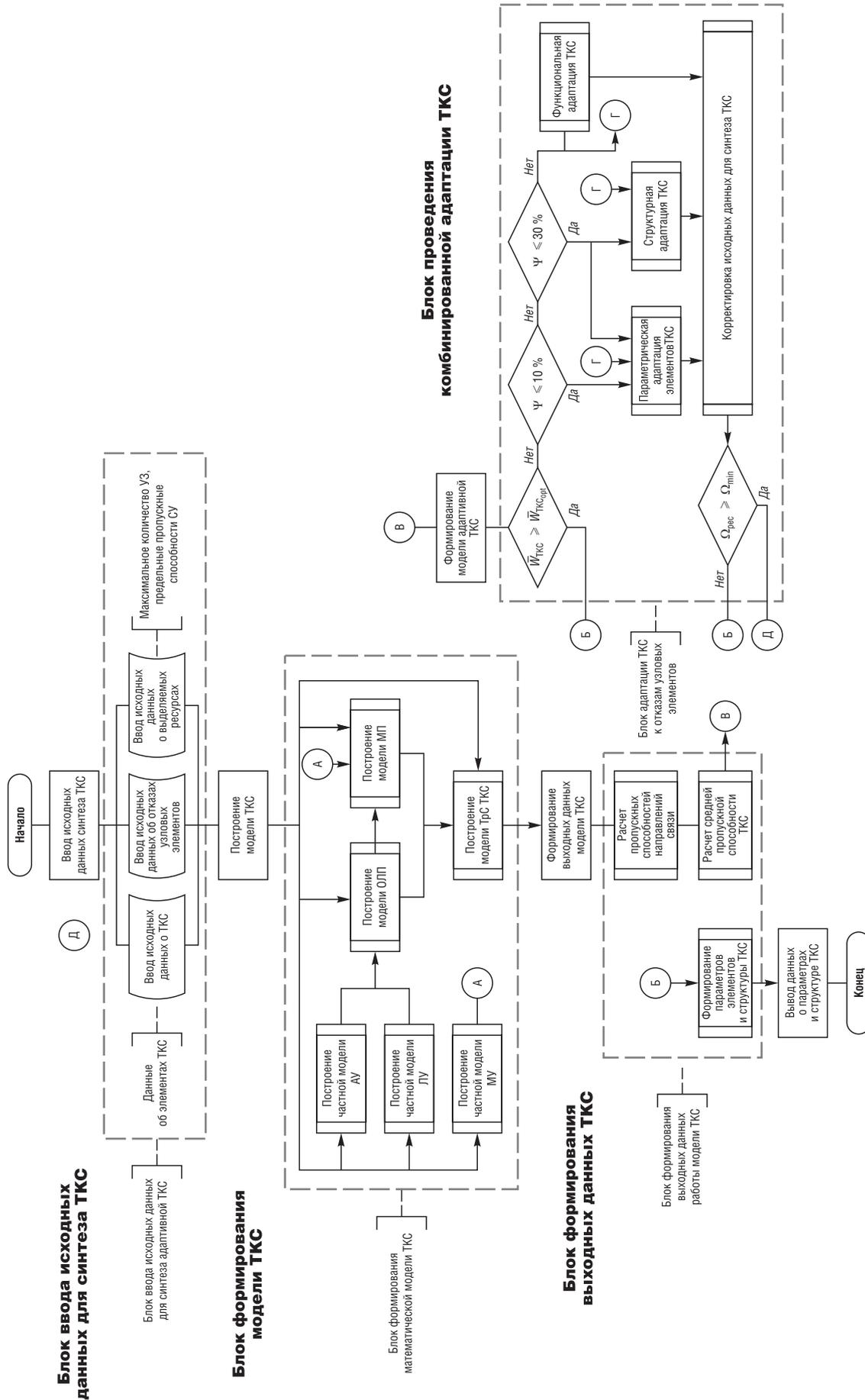


Рис. 1. Блок-схема структурно-параметрического синтеза адаптивной (самоорганизующейся) телекоммуникационной сети

Fig. 1. The block diagram of structurally-parametrical synthesis of an adaptive telecommunication network

В качестве *исходных данных* проведения синтеза АТКС приняты:

непосредственно данные о ТКС ($S_{\text{ТКС}}$ – площадь (размеры) зоны обслуживания ТКС; Φ – общее (суммарное) количество АУ, зарегистрированных в ТКС; $\mathbf{A}_{xy}^{\text{AY}}$ – матрица координат АУ [2]; параметры качества обслуживания QoS);

данные о выделяемых ресурсных затратах $\Omega_{\text{рес}}$ ($\max \Lambda$, $\max E$ – максимально выделяемое количество ЛУ и МУ соответственно; $\Delta \Lambda$, ΔE – избыточное (резервное) количество ЛУ и МУ соответственно; $\mathbf{R}_{\Lambda}^{\max}$, \mathbf{R}_E^{\max} – матрицы максимальных пропускных способностей ШКС, организуемых ЛУ и МУ соответственно; $N_{\text{алг.пар}}$, $N_{\text{алг.стр}}$ – количество алгоритмов (способов) параметрической и структурной адаптации соответственно);

данные о степени интенсивности отказов сетевых устройств, определяемые *матрицей воздействий на УЭ сети* $\mathbf{A}_{\Psi}^{\text{УЭ}}|_{t_0}$ в момент времени t_0 [5, 6].

За *выходные данные* синтеза АТКС приняты: Λ , E – текущее количество ЛУ и МУ соответственно; структура обобщающей локальной подсети (ОЛП) в виде матриц координат ЛУ $\mathbf{A}_{xy}^{\text{ЛУ}}$ и их пропускных способностей $\mathbf{A}_{W(\text{ЛУ})}^{\text{ТКС}}$; структура магистральной подсети (МП) в виде матриц координат МУ $\mathbf{A}_{xy}^{\text{МУ}}$ и их пропускных способностей $\mathbf{A}_{W(\text{МУ})}^{\text{ТКС}}$; $\mathbf{A}_W^{\text{ТКС}}$ – матрица пропускных способностей элементов ТКС, объединяющая матрицы $\mathbf{A}_{W(\text{ЛУ})}^{\text{ТКС}}$ и $\mathbf{A}_{W(\text{МУ})}^{\text{ТКС}}$; $\overline{W}_{\text{ТКС}}$ – пропускная способность ТКС [5, 6].

В рамках *параметрического синтеза* рассматривается уточненная совокупность ранее полученных выражений (см. [2, 7]) агрегативных моделей сетевых устройств ТКС:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_{\text{AY}i} \Big|_{i=1, \overline{\Phi}} &= \mathfrak{M} \left[\begin{aligned} &\mathbf{A}_{(\text{AY}i)}^{(\text{ПрМА})} \left(Z_{1A}^{(\text{AY}i)}, Z_{2A}^{(\text{AY}i)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{AY}i)}^{(\text{АП})} \left(Z_{\text{пам}}^{(\text{AY}i)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{AY}i)}^{(\text{РА})} \left(Z_{\text{пер}}^{(\text{AY}i)} \right) \times \\ &\times \mathbf{A}_{(\text{AY}i)}^{(\text{ПрдА})} \left(Z_{\text{контр}}^{(\text{AY}i)} \right) \end{aligned} \right], \\ \mathbf{A}_{\text{ЛУ}\beta} \Big|_{\beta=1, \overline{\Lambda}} &= \mathfrak{M} \left[\begin{aligned} &\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрМАА})} \left(Z_{1i}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{2i}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрМАМ})} \left(Z_{3\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{4\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \times \\ &\times \mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{КА})} \left(Z_{7i}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{8i}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{9\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{10\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрдАА})} \left(Z_{11i}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{12i}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \times \\ &\times \mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрдАМ})} \left(Z_{13\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)} \right) \end{aligned} \right], \\ \mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha} \Big|_{\alpha=1, \overline{E}} &= \mathfrak{M} \left[\begin{aligned} &\mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Прм})} \left(Z_{1\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)} \right) \times \mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Мрш})} \left(Z_{3\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, Z_{4\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, M \left(\mathbf{Z}_{(\text{Мрш})}^{(\text{МУ}\alpha)} \right) \right) \times \\ &\times \mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Прд})} \left(Z_{5\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)} \right) \end{aligned} \right], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $\mathbf{A}_{\text{AY}i}$, $\mathbf{A}_{\text{ЛУ}\beta}$, $\mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha}$ – частные математические модели i -го АУ, β -го ЛУ и α -го МУ соответственно; $\mathbf{A}_{(\text{AY}i)}^{(\text{ПрМА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{AY}i)}^{(\text{АП})}$, $\mathbf{A}_{(\text{AY}i)}^{(\text{РА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{AY}i)}^{(\text{ПрдА})}$ – приемный, памяти, решающий и передающий агрегаты модели i -го АУ соответственно; $\left[Z_{1A}^{(\text{AY}i)}(t), Z_{2A}^{(\text{AY}i)}(t), Z_{\text{пам}}^{(\text{AY}i)}(t), Z_{\text{пер}}^{(\text{AY}i)}(t), Z_{\text{контр}}^{(\text{AY}i)}(t) \right]$ – операторы состояния i -го АУ; $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрМАА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрМАМ})}$, $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{КА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрдАА})}$, $\mathbf{A}_{(\text{ЛУ}\beta)}^{(\text{ПрдАМ})}$ – приемные абонентский и магистральный, коммутаторный, передающие абонентский и магистральный агрегаты модели β -го ЛУ соответственно; $\left[Z_{1i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t), Z_{2i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t), Z_{7i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t), Z_{8i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t), Z_{11i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t) \right]$ – операторы адаптации в абонентской части модели β -го ЛУ; $Z_{12i}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t)$ – оператор проверки занятости памяти агрегата $\mathbf{A}_{\text{ЛУ}}^{\text{ПрдАА}}$; $\left[Z_{3\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{4\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{10\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t) \right]$ – операторы адаптации в магистральной части модели β -го ЛУ; $\left[Z_{9\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}, Z_{13\alpha}^{(\text{ЛУ}\beta)}(t) \right]$ – операторы состояния элементарных каналов модели β -го ЛУ в сторону α -го УЭ; $\mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Прм})}$, $\mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Мрш})}$, $\mathbf{A}_{(\text{МУ}\alpha)}^{(\text{Прд})}$ – приемный, маршрутный и передающий агрегаты модели α -го МУ соответственно; $\left[Z_{1\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}(t), Z_{3\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, Z_{4\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, Z_{5\Theta}^{(\text{МУ}\alpha)}, M \left(\mathbf{Z}_{(\text{Мрш})}^{(\text{МУ}\alpha)} \right) \right]$ – операторы состояния модели α -го МУ; \mathfrak{M} – знак системы множеств элементов (агрегатов); « \times » – знак прямого произведения множеств, составляющих агрегаты частных математических моделей.

Структурный синтез с учетом принятой в [2, 7] агрегативной модели системы связи включает определение состава, перечней типовых элементов, способов взаимодействия (связей) в подсетях (локальных и магистральных), ТКС в целом и математически представляется в виде

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{M}_{\text{ТКС}} &= \mathfrak{M}(\mathbf{M}_{\text{ОЛП}} \cup \mathbf{M}_{\text{МП}}) \Big|_{\mathbf{A}_{\text{ТКС}}^W}, \\ \mathbf{M}_{\text{ОЛП}} &= \mathfrak{M}[(\mathbf{A}_{\text{АУ1}} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{АУ}i} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{АУФ}}) \cup (\mathbf{A}_{\text{ЛУ1}} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{ЛУ}i} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{ЛУЛ}})] \Big|_{\mathbf{A}_{\text{адр, Аком}}}, \\ \mathbf{M}_{\text{МП}} &= \mathfrak{M}(\mathbf{A}_{\text{МУ1}} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{МУ}\alpha} \times \dots \times \mathbf{A}_{\text{МУЕ}}) \Big|_{\mathbf{A}_{\text{мрш}}}, \\ W_{\text{эл } ij}(t) &= \min(\min W_{\text{ЛУ}}(t), \min W_{\text{МУ}}(t), \min C_{\text{шк}}(t)), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\mathbf{M}_{\text{ОЛП}}$ – модель ОЛП (множество СУ локальных подсетей), определяемая частными математическими моделями выражения (1), коммутационной $\mathbf{A}_{\text{ком}}$ и адресной $\mathbf{A}_{\text{адр}}$ матрицами (таблицами); $\mathbf{M}_{\text{МП}}$ – модель МП (множество СУ магистральной подсети), определяемая частной математической моделью выражения (1) и маршрутной матрицей (таблицей) $\mathbf{A}_{\text{мрш}}$; $W_{\text{эл } ij}(t)$ – пропускная способность ij -го элементарного канала связи [7]; $\min W_{\text{ЛУ}}(t) = \min[W_{\text{ЛУ1}}(t), \dots, W_{\text{ЛУЛ}}(t)]$ – минимальная пропускная способность множества ЛУ, выделяемая ij -му элементарному каналу связи; $\min W_{\text{МУ}}(t) = \min[W_{\text{МУ1}}(t), \dots, W_{\text{МУЕ}}(t)]$ – минимальная пропускная способность множества МУ, выделяемая ij -му элементарному каналу связи; $\min C_{\text{шк}}(t) = \min[C_{\text{шк } 12}(t), \dots, C_{\text{шк } (N-1)N}(t)]$ – минимальная пропускная способность ШКС между смежными СУ.

Выражения (1) и (2) структурно-параметрического синтеза модели ТКС применяются при рассмотрении комбинированной адаптации ее к отказам УЭ.

В процессе синтеза (см. рис. 1) АТКС осуществляется:

параметрическая адаптация в СУ беспроводной системы связи при низкой степени отказов (до 10 %) узловых элементов и ограничениях на пропускные способности ШКС;

адаптация структуры ТрС сети при средней степени отказов (от 10 до 30 %) узловых элементов и ограничениях на ресурсные затраты по количеству многофункциональных устройств связи;

функциональная адаптация элементов ТКС с учетом результатов проведения структурно-параметрической адаптации при высокой степени отказов (от 30 до 50 %) узловых элементов.

Эффективность функционирования полученной при использовании методики структурно-параметрического синтеза адаптивной системы связи проверялась в процессе проведения имитационного эксперимента с применением ранее полученных в [2] данных натурального эксперимента на сегменте сети широкополосного беспроводного доступа.

Синтез модели телекоммуникационной сети со структурно-параметрической (комплексной) адаптацией. Структурно-параметрическая (комплексная) адаптация ТКС возможна при рассмотрении целенаправленного изменения параметров элементов системы связи с учетом проведения структурной адаптации ТрС сети.

В качестве критериев структурно-параметрической (комплексной) адаптации выбирались:

при осуществлении параметрической адаптации – максимальная пропускная способность p -го УЭ: $W_{pp} \Big|_{p \in (1, (\Lambda + E))} \rightarrow \max W_{pp} \Big|_{p \in (1, (\Lambda + E))}$;

при осуществлении структурной адаптации – минимально необходимое количество резервных (избыточных) УЭ ТрС сети: $(\Delta\Lambda + \Delta E) \rightarrow \min$.

Необходимо также отметить и то, что экспериментальные данные, полученные при исследовании сетей широкополосной радиосвязи на основе стандартов Wi-Fi [8], показали явную зависимость времени обработки пакетов сообщения от внедрения различных способов адаптации. В частности, применение эффективных алгоритмов адаптации (как параметрических, так и структурных) позволило сократить время нахождения информационных данных в широкополосных устройствах связи в несколько раз.

Параметрическая адаптация ТКС заключается в последовательном изменении во времени операторов состояний СУ системы связи в основном с целью уменьшения последствий воздействия преднамеренных помех (низкая степень отказа узловых элементов сети).

Последовательность адаптивного определения параметров ТКС осуществляется в следующем порядке:

1. Ввод исходных данных проведения параметрического синтеза: определение внутренних параметров (операторов состояний) частных математических моделей СУ (см. выражение (1)) в момент времени t_0 ; с учетом выбранной структуры ТКС установление фактических пропускных способностей ШКС; выбор ограничений при проведении параметрической адаптации ТКС – значений матриц максимальных пропускных способностей ШКС и количества алгоритмов параметрической адаптации.

2. Проверка ресурсов, выделяемых для проведения параметрической адаптации ТКС, основывается на сравнении текущих откорректированных пропускных способностей ШКС относительно заданных в ограничениях.

Математически указанный подпроцесс сравнения пропускных способностей имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} & \forall (\mathbf{A}_{МУ\alpha}, \alpha = \overline{1, E}), \exists \left(\left(\|a_{ij}\| \in \mathbf{A}_{W(МУ)}^{ТКС}, i = \overline{1, E}; j = \overline{1, E} \right) \wedge \left(\|r_{ml}\| \in \mathbf{R}_E^{\max}, m = \overline{1, E}; l = \overline{1, E} \right) \right) : \\ & : \left\{ \|r_{ml}\| \geq \|a_{ij}\|, m = l, i = j \right\}, \\ & \forall (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda}), \exists \left(\left(\|a_{ug}\| \in \mathbf{A}_{W(ЛУ)}^{ТКС}, u = \overline{1, \Lambda}; g = \overline{1, \Lambda} \right) \wedge \left(\|r_{nb}\| \in \mathbf{R}_\Lambda^{\max}, n = \overline{1, \Lambda}; b = \overline{1, \Lambda} \right) \right) : \\ & : \left\{ \|r_{nb}\| \geq \|a_{ug}\|, n = u, b = g \right\}. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

3. Из заданного перечня алгоритмов (способов) параметрической адаптации ТКС выбирается последовательно наиболее эффективный по критерию обеспечения наименьшей задержки пакета сообщения в сети:

$$\left. \begin{aligned} & \forall \left(\left(\mathbf{A}_{МУ\alpha}, \alpha = \overline{1, E} \right) \wedge \left(\mathbf{A}_{ЛУ\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda} \right) \wedge \left(\mathbf{A}_{АУi}, i = \overline{1, \Phi} \right) \right), \exists (\zeta_{пар.с} \in P_{пар}) : \\ & : \left\{ \left\langle \tau(\mathbf{Z}_{ЛУ\beta}(\Delta t_{пар.с})) < \tau(\mathbf{Z}_{ЛУ\beta}(t_0)) \right\rangle \wedge \left\langle \tau(\mathbf{Z}_{МУ\alpha}(\Delta t_{пар.с})) < \tau(\mathbf{Z}_{МУ\alpha}(t_0)) \right\rangle \right\} \wedge \\ & \wedge \left\langle \tau(\mathbf{Z}_{АУi}(\Delta t_{пар.с})) < \tau(\mathbf{Z}_{АУi}(t_0)) \right\rangle \left(V_{инф.ЛУ\beta}(t_0 + \Delta t_{пар.с}) = \text{const} \right) \wedge \\ & \wedge \left(V_{инф.МУ\alpha}(t_0 + \Delta t_{пар.с}) = \text{const} \right) \wedge \left(V_{инф.АУi}(t_0 + \Delta t_{пар.с}) = \text{const} \right) \left. \right\}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\zeta_{пар.с}$ – c -й алгоритм параметрической адаптации из множества $P_{пар}$; $\tau(\mathbf{Z}_{СУ}(t_{пар.с}))$ – время, затрачиваемое на обработку пакетов в СУ с учетом осуществления параметрической адаптации; $\tau(\mathbf{Z}_{СУ}(t_0))$ – время, затрачиваемое на обработку пакетов сообщений в СУ без учета параметрической адаптации; $\mathbf{Z}_{АУi}(t)$, $\mathbf{Z}_{ЛУ\beta}(t)$, $\mathbf{Z}_{МУ\alpha}(t)$ – обобщенные операторы внутреннего состояния АУ, ЛУ и МУ соответственно [2, 7]; $\Delta t_{пар.с}$ – время проведения цикла параметрической адаптации; $V_{инф.АУi}(t_0 + \Delta t_{пар.с})$, $V_{инф.ЛУ\beta}(t_0 + \Delta t_{пар.с})$, $V_{инф.МУ\alpha}(t_0 + \Delta t_{пар.с})$ – объем информационных данных (пакетов), обрабатываемых i -м АУ, β -м ЛУ и α -м МУ соответственно за время $\Delta t_{пар.с}$.

В выражении (4) в состав кроме обобщенных операторов внутреннего состояния СУ включены дополнительные компоненты, учитывающие механизм параметрической адаптации. Ограничением для выбора определенного способа (правила, алгоритма) адаптации является время обработки информационных данных. Иными словами, применение дополнительных операторов адаптации не только не должно ухудшить пропускную способность СУ (увеличить время нахождения пакета), а наоборот увеличить этот показатель.

В качестве основных алгоритмов (способов) параметрической адаптации ТКС могут выступать:

1. *Способ изменения назначения пакета.* В рамках параметрической адаптации доля служебных пакетов изменяется в зависимости от выбора с учетом структурной адаптации протоколов маршрутизации. То есть различные маршрутные алгоритмы отличаются затратами на служебную информацию. В нормальном режиме эксплуатации сети выбирается необходимая пропорция данных пакета сообщения [4], обеспечивающая передачу необходимых объемов информации за допустимое время.

2. *Оптимальное сочетание методов кодирования, модуляции, расширения спектра и обработки сигнала* [1]. Это достигается за счет применения на различных этапах функционирования ТКС (с отказами и без отказов УЭ) определенных протоколов сетевого, канального и физическо-го уровней эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМОС) (например, протоколов случайного множественного доступа (СМД) P-ALOHA, S-ALOHA, CSMA/CD и т. д.) [9].

Пропускная способность ШКС локальной подсети (ЛП) в выражении (2) при использовании различных протоколов СМД равна

$$C_{\text{ШКС}}(t) = \begin{cases} C_{\text{max}}(t)e^{-2C_{\text{max}}(t)}P_{\text{пр}} & \text{при P-ALOHA,} \\ C_{\text{max}}(t)e^{-C_{\text{max}}(t)}P_{\text{пр}} & \text{при S-ALOHA,} \end{cases} \quad (5)$$

где $C_{\text{max}}(t)$ – номинальная (максимальная по Шеннону) пропускная способность ШКС в момент времени t ; $P_{\text{пр}}$ – вероятность правильного приема пакета данных.

Для повышения пропускной способности ШКС выражения (5) необходимо использовать модификации *адаптивного протокола* с захватом сигнала CSMA/CD.

3. *Адаптивная борьба с интермодуляционными шумами* (устранение влияния других станций на базовую станцию) – автоматический контроль и регулирование мощности излучаемого сигнала [4].

4. *Адаптивная процедура выбора АУ локальной подсети*. Физический смысл адаптивной процедуры выбора регистрации абонентов состоит в том, что АУ, находящиеся на пересечении зон обслуживания нескольких ЛУ, регистрируются на той точке доступа, где обеспечивается наилучший прием радиосигнала. При равенстве дистанций связи регистрация осуществляется в ЛП с наименьшим количеством АУ.

В случае нахождения абонентов на пересечение зон обслуживания нескольких ЛУ выполняется адаптивная процедура выбора абонентским устройством ЛУ:

$$\exists (S_{\beta}, S_{(\beta+1)}), \forall [AУ_i \in (S_{\beta}, S_{(\beta+1)})]: \begin{cases} d_{\beta i} < d_{(\beta+1)i} \Rightarrow AУ_i \in ЛУ_{\beta}; \\ d_{\beta i} > d_{(\beta+1)i} \Rightarrow AУ_i \in ЛУ_{(\beta+1)}; \\ d_{\beta i} = d_{(\beta+1)i} \Rightarrow \begin{cases} AУ_i \in ЛУ_{\beta}, & \text{при } n_{ЛУ_{\beta}}^{AУ} < n_{ЛУ_{(\beta+1)}}^{AУ}; \\ AУ_i \in ЛУ_{\beta}, & \text{при } n_{ЛУ_{\beta}}^{AУ} > n_{ЛУ_{(\beta+1)}}^{AУ}, \end{cases} \end{cases}$$

где $S_{\beta}, S_{(\beta+1)}$ – зона обслуживания β -го и $(\beta+1)$ -го смежных ЛУ соответственно; $d_{\beta i} = \sqrt{(x_{\beta} - x_i)^2 + (y_{\beta} - y_i)^2}$ – расстояние между i -м АУ и β -м ЛУ; (x_{β}, y_{β}) – координаты β -го ЛУ в прямоугольной системе координат; (x_i, y_i) – координаты i -го АУ в прямоугольной системе координат; $d_{(\beta+1)i} = \sqrt{(x_{(\beta+1)} - x_i)^2 + (y_{(\beta+1)} - y_i)^2}$ – расстояние между i -м АУ и $(\beta+1)$ -м ЛУ; $(x_{(\beta+1)}, y_{(\beta+1)})$ – координаты $(\beta+1)$ -го ЛУ; $n_{ЛУ_{\beta}}^{AУ}, n_{ЛУ_{(\beta+1)}}^{AУ}$ – количество зарегистрированных абонентских устройств на β -м и $(\beta+1)$ -м ЛУ соответственно.

Что касается *структурно-параметрической (комплексной) адаптации*, то в процессе ее проведения последовательно во времени изменяются элементный состав подсетей и порядок взаимодействия между СУ. Порядок проведения адаптации в рамках параметрического синтеза приведен ранее в статье, поэтому далее более подробно остановимся на структурной адаптации.

Порядок проведения структурной адаптации с учетом параметрической включает способы (алгоритмы) определения рационального состава подсетей, в основном с целью замены (добавления) вышедших из строя (отказавших) СУ и восстановления целостности связей в ТРС сети. Также в качестве резервных УЭ могут выступать устройства, размещенные как на мобильных наземных (колесном и гусеничном автотранспорте), так и воздушных (пилотируемых и беспилотных летальных аппаратах) объектах.

В качестве основных *алгоритмов (способов) структурной адаптации* ТКС могут выступать:

1. В зависимости от состояния СУ рациональное использование (чередование) модифицированных детерминированных и поисковых методов распределения потоков внутри ТКС

(например, методы Флойда, Дейкстры, квазиминоров и обмена минимальными векторами весов) в составе процедур повышения надежности, обеспечивающих доставку пакетов сообщений по нескольким независимым маршрутам [10]. При этом выбор определенного способа маршрутизации в ТКС $M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(TKC)})$ основывается на уменьшении среднего времени $\tau_{3.T}$ передачи тестовых пакетов сообщений в сети:

$$M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(TKC)}) = \left[\begin{array}{l} \exists \langle \rho_{алг.k} \subset M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(M\sigma)}) \rangle \wedge \langle \mathbf{B}_{инф.s} \subset M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(M\sigma)}) \rangle : \\ \text{при } \langle G(\mathbf{M}\sigma) \in G(\mathbf{M}_{TKC}) \rangle \wedge \langle \tau_{3.T} \leq \tau_{пор.k} \rangle \end{array} \right], \quad (6)$$

где $\rho_{алг.k}$ – k -й модифицированный алгоритм нахождения кратчайшего маршрута между сетевыми устройствами $M\sigma$ -й подсети; $M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(M\sigma)})$ – маршрутный алгоритм $M\sigma$ -й подсети; $\mathbf{B}_{инф.s}$ – s -я информационная матрица; $G(\mathbf{M}\sigma)$ – структура $M\sigma$ -й подсети; $\tau_{пор.k}$ – пороговое время передачи пакета в подсети, которое соответствует $\rho_{алг.k}$ -му алгоритму.

Выражение (6) определяет порядок выбора рационального алгоритма распределения внутренних потоков пакетов сообщений в ТКС с учетом состояния подсетей, характеризующихся различными информационными матрицами $\mathbf{B}_{инф.s}$ (например, аккордной матрицей, матрицей весов и т. п. [10]) и собственными алгоритмами $M(\mathbf{Z}_{(Mrш)}^{(M\sigma)})$ нахождения кратчайших путей между СУ.

2. Использование рациональной избыточности узловых элементов ТрС сети. Рациональная избыточность структуры ТКС $G(\mathbf{M}_{TKC})$ достигается за счет анализа состояния элементов матриц $\mathbf{A}_{\Psi}^{УЭ}$

$$G(\mathbf{M}_{TKC}) = \left\{ \begin{array}{l} \forall (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda}), \exists (\psi_{ЛУ\beta} \in \mathbf{A}_{\Psi}^{УЭ}) : G(\mathbf{M}_{ОЛП} / \mathbf{A}_{ЛУ\beta}) \text{ при } [(\Lambda \leq \max \Lambda) \wedge \\ \wedge (W_{ЛУ\beta}(t) < W_{ЛУ\text{доп}}, W_{ЛУ\beta}(t) \in \mathbf{A}_{W(ЛУ)}^{TKC}) \wedge (\Delta\Lambda - 1)]; \\ \forall (\mathbf{A}_{МУ\alpha}, \alpha = \overline{1, E}), \exists (\psi_{МУ\alpha} \in \mathbf{A}_{\Psi}^{УЭ}) : G(\mathbf{M}_{МП} / \mathbf{A}_{МУ\alpha}) \text{ при } [(E \leq \max E) \wedge \\ \wedge (W_{МУ\alpha}(t) < W_{МУ\text{доп}}, W_{МУ\alpha}(t) \in \mathbf{A}_{W(МУ)}^{TKC}) \wedge (\Delta E - 1)]; \\ \forall (\mathbf{A}_{МУ\beta}, \beta = \overline{1, \Delta E}), \exists (G(\mathbf{M}_{МП})) : \deg[\mathbf{A}_{МУ\beta} \in G(\mathbf{M}_{МП})] \geq 2, \end{array} \right. \quad (7)$$

где $W_{ЛУ\text{доп}}$ – допустимая пропускная способность ЛУ, при которой обеспечивается эффективная передача информационных данных как в сторону зарегистрированных АУ, так и в сторону МП; $W_{МУ\text{доп}}$ – допустимая пропускная способность МУ, при которой обеспечивается эффективная передача данных между смежными УЭ; «/» – знак добавления УЭ; $G(\mathbf{M}_{МП})$ – структура МП; $\mathbf{A}_{МУ\beta}$ – модель резервного МУ.

Физический смысл выражения (7) заключается в том, что при отказе (выводе из строя) УЭ значительно уменьшается его пропускная способность. Последствия преднамеренных негативных воздействий могут быть устранены за счет добавления (замены) соответствующих УЭ резервными. При этом структурные изменения в МП должны обеспечить прохождение пакетов сообщений не менее чем по двум независимым маршрутам.

Процесс выбора типа (воздушного или наземного базирования) резервных УЭ носит адаптивный характер для структур ОЛП и МП:

$$G(\mathbf{M}_{ОЛП}) = \left\{ \begin{array}{l} \langle \forall (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda}), \exists (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}) : \mathbf{A}_{ЛУ\beta} \in P(\mathbf{A}_{ЛУ\text{наз}}) \rangle \\ \text{при } \langle D_{пр.св.\beta} \leq M(d_{св.\beta} (P_{прм} \geq P_{порог})) \rangle; \\ \langle \forall (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}, \beta = \overline{1, \Lambda}), \exists (\mathbf{A}_{ЛУ\beta}) : \mathbf{A}_{ЛУ\beta} \in P(\mathbf{A}_{ЛУ\text{возд}}) \rangle \\ \text{при } \langle D_{пр.св.\beta} > M(d_{св.\beta} (P_{прм} \geq P_{порог})) \rangle, \end{array} \right.$$

$$G(\mathbf{M}_{МП}) = \begin{cases} \left\langle \forall (\mathbf{A}_{МУ\alpha}, \alpha = \overline{1, E}), \exists (\mathbf{A}_{МУ\beta}) : \mathbf{A}_{МУ\beta} \in P(\mathbf{A}_{МУ\text{наз}}) \right\rangle \\ \text{при } \left\langle D_{пр.св.\beta} \leq M(d_{св.\alpha} (P_{прм} \geq P_{порог})) \right\rangle; \\ \left\langle \forall (\mathbf{A}_{МУ\alpha}, \alpha = \overline{1, E}), \exists (\mathbf{A}_{МУ\beta}) : \mathbf{A}_{МУ\beta} \in P(\mathbf{A}_{МУ\text{возд}}) \right\rangle \\ \text{при } \left\langle D_{пр.св.\alpha} > M(d_{св.\alpha} (P_{прм} \geq P_{порог})) \right\rangle, \end{cases} \quad (8)$$

где $P(\mathbf{A}_{ЛУ\text{наз}})$, $P(\mathbf{A}_{ЛУ\text{возд}})$ – множества резервных наземных и воздушных ЛУ соответственно; $P(\mathbf{A}_{МУ\text{наз}})$, $P(\mathbf{A}_{МУ\text{возд}})$ – множества резервных наземных и воздушных МУ соответственно; $D_{пр.св.\beta}$, $D_{пр.св.\alpha}$ – дальность прямой видимости между смежными УЭ и заменяемым (резервируемым) ЛУ и МУ соответственно; $M(d_{св.\beta} (P_{прм} \geq P_{порог}))$, $M(d_{св.\alpha} (P_{прм} \geq P_{порог}))$ – среднее значение дистанции уверенной связи (при превышении мощности в точке приема сигнала $P_{прм}$ над пороговым $P_{порог}$) между смежными взаимодействующими СУ и заменяемым (резервируемым) ЛУ и МУ соответственно.

Процедура, представленная выражением (8), позволяет за счет изменения дальности прямой видимости более эффективно использовать резервные средства связи, обеспечивающие уверенный прием широкополосных радиосигналов на значительных дистанциях связи.

Синтез модели самоорганизующейся телекоммуникационной сети. Для завершения комбинированной адаптации к отказам узловых элементов высокой интенсивности проводится процедура функциональной адаптации по результатам структурно-параметрической.

Функциональная адаптация элементов ТКС осуществляется тогда, когда количество УЭ исчерпано, а алгоритмы параметрической адаптации не позволяют обеспечить эффективную передачу данных от АУ – формирователей сообщений ($\mathbf{A}_{УФС}$) к АУ – получателям сообщения ($\mathbf{A}_{УПС}$). При этом для проведения функциональной адаптации выбирается группа тех элементов, где наименьшая пропускная способность элементарного канала $W_{эл\ ij}(t)$, то есть путь π_{ik} между $\mathbf{A}_{У_i}$ ($\mathbf{A}_{УФС}$) и $\mathbf{A}_{У_k}$ ($\mathbf{A}_{УПС}$), через который проходит ij -логический канал.

Математически функциональную адаптацию можно представить в следующем виде:

$$\xi(\mathbf{M}_{ТКС}) = \begin{cases} \left\langle \xi(\mathbf{A}_{АУ_i}) / \xi_k(\mathbf{A}_{ЛУ\beta}) \right\rangle \text{ при } \left\langle G(\mathbf{M}_{ОЛП}) \setminus \mathbf{A}_{ЛУ\beta} \right\rangle \wedge \left\langle \mathbf{A}_{АУ_i} \in G(\mathbf{M}_{ЛУ\beta}) \right\rangle, \\ \left\langle \xi(\mathbf{A}_{ЛУ_j}) / \xi_m(\mathbf{A}_{МУ\alpha}) \right\rangle \text{ при } \left\langle G(\mathbf{M}_{МП}) \setminus \mathbf{A}_{МУ\alpha} \right\rangle \wedge \left\langle \mathbf{A}_{ЛУ_j} \cap \mathbf{A}_{МУ\alpha} \right\rangle, \end{cases} \quad (9)$$

где $\xi(\mathbf{M}_{ТКС})$ – множества функций, выполняемых ТКС; $\xi(\mathbf{A}_{АУ_i})$, $\xi(\mathbf{A}_{ЛУ_j})$ – множества функций, выполняемых i -м АУ и j -м ЛУ соответственно; $\xi_k(\mathbf{A}_{ЛУ\beta})$ – k -я функция β -го ЛУ; $\xi_m(\mathbf{A}_{МУ\alpha})$ – m -я функция α -го МУ; $G(\mathbf{M}_{ЛУ\beta})$ – структура β -й локальной подсети; « \setminus » – знак удаления.

Первая строка правой части выражения (9) определяет порядок передачи части функций между элементами внутри локальной подсети, а вторая строка – между разнородными элементами локальной и магистральной подсетей. При этом передача функций осуществляется между смежными СУ, то есть физически – между устройствами, непосредственно обменивающимися служебными пакетами.

Таким образом, рациональное и последовательное применение алгоритмов комбинированной адаптации в условиях высокой интенсивности отказов узловых элементов наделяет ТКС следующими свойствами самоорганизации с характерными признаками [11]:

1. Сетевые устройства системы связи сами участвуют в управлении сетью.
2. Сетевые устройства взаимодействуют по средствам обмена служебными данными как при передаче информационных сообщений ИУС, так и в процессе адаптации (самоорганизации).
3. В процессе преднамеренных воздействий на систему связи сетевые устройства (подсети) формируют правила, обеспечивающие необходимые условия взаимодействия элементов ИУС.

Оценка эффективности функционирования адаптивной ТКС, построенной с помощью описанной методики структурно-параметрического синтеза, осуществлялась по результатам проведения имитационного моделирования (эксперимента) с математическими моделями существующей и перспективной ТКС ИУС.

Сравнительные результаты имитационного моделирования беспроводной телекоммуникационной сети с пакетной коммутацией. Для оценки эффективности предложенной методики синтеза АТКС проводился имитационный эксперимент (ИЭ).

В процессе проведения эксперимента с математическими моделями ТКС применялся метод статистических испытаний (метод Монте-Карло) [12], который предполагает многократное воспроизведение (имитацию) процессов обмена (передачи) пакетами сообщений между сетевыми устройствами с сохранением их порядка следования по времени с учетом случайных условий функционирования подсетей.

Математические модели ТКС изучались с использованием возможностей специального программного пакета MatLab. В качестве исследуемой структуры ТКС рассматривалась перспективная система связи, построенной на средствах широкополосной радиосвязи [8], которые должны обеспечить своевременную передачу видеосообщений между элементами ИУС.

В зависимости от используемого телекоммуникационного оборудования и на основании работы [8] нами выбрана средняя скорость в элементарных (логических) каналах ТКС:

достаточная $\bar{W}_{\text{порог}}$ (2,5 Мбит/с) – для мобильных автоматизированных рабочих мест (МАРМ) при обмене речевыми, видеосообщениями и данными. АТКС при уменьшении $\bar{W}_{\text{ТКС}}$ ниже $\bar{W}_{\text{порог}}$ системой управления принимается решение о переходе на более высокий уровень адаптации;

необходимая \bar{W}_n (2 Мбит/с) – МАРМ при приеме видеоданных от оптико-электронных средств разведки в режиме реального времени.

Имитационное моделирование АТКС проводилось поэтапно в условиях изменения:

количества функционирующих абонентских устройств при постоянных размерах зоны обслуживания и без учета отказов элементов сети;

интенсивности отказов узловых элементов при фиксированных значениях размеров зоны обслуживания и количества абонентских устройств сети.

Для выбранных значений доверительной вероятности $\alpha = 95$ и точности оценки $\varepsilon = 0,05$ получено число реализаций ИЭ (количество испытаний), которое составило более $N = 1552$ [12].

По результатам первого этапа ИЭ в условиях имитации отказов УЭ при фиксированной площади зоны обслуживания ($S_{\text{ТКС}} = 45 \text{ км}^2$) и с учетом обеспечения необходимой \bar{W}_n (более 2 Мбит/с) в существующей ТКС за значение максимального количества абонентских устройств выбрано число 12.

Экспериментальные данные второго этапа ИЭ показали, что математическая модель перспективной АТКС средних масштабов (от 10 до 60 АУ) (рис. 2, кривая 2) в меньшей степени подвержена отказам узловых элементов, чем модель существующей ТКС (рис. 2, кривая 1).

В модели АТКС сохраняется необходимая \bar{W}_n средняя пропускная способность (2 Мбит/с) при выходе из строя (отказе) до 40 % узловых элементов ТрС сети (рис. 2, точка А). При этом в результате увеличения внутри сети трафика служебной информации время реакции алгоритма комбинированной адаптации ($\Delta t_{\text{реак.комб}}$) больше, чем при параметрической и комплексной (структурно-параметрической) адаптациях ($\Delta t_{\text{реак.парам}}$, $\Delta t_{\text{реак.компл}}$) (см. рис. 2). Также временной эффект $\Delta t_{\text{компл.эф}}$ от проведения комплексной адаптации выше в сравнении с параметрической $\Delta t_{\text{парам.эф}}$ и комбинированной $\Delta t_{\text{комб.эф}}$ адаптациями по причине рационального использования резервных УЭ.

В процессе проведения ИЭ нами было выяснено, что устойчивость к отказам элементов модели перспективной АТКС достигается за счет уменьшения времени задержки обработки пакетов сообщений в УЭ при рациональном выборе операторов адаптации частных моделей, структуры подсетей ТрС и изменения функций СУ.

Относительная оценка пропускной способности моделей ТКС (до 12 АУ), согласно данным рис. 2, при различной интенсивности отказов узловых элементов приведена в таблице.

Относительная оценка пропускной способности телекоммуникационной сети в зависимости от интенсивности отказов узловых элементов

Relative estimation of throughput of a telecommunication network depending on failure rate of central elements

Измеряемые параметры	Интенсивность отказов УЭ, %				
	низкая	средняя		высокая	
	10	20	30	40	45
$\bar{W}_{\text{ТКС}}$, Мбит/с	2,2	0,55	0,102	0,024	0,024
$\bar{W}_{\text{АТКС}}$, Мбит/с	2,62	2,56	2,1	2,1	0,6
$\Delta_{\text{отн}} = \bar{W}_{\text{АТКС}} / \bar{W}_{\text{ТКС}}$	1,19	4,65	20,58	87,5	25

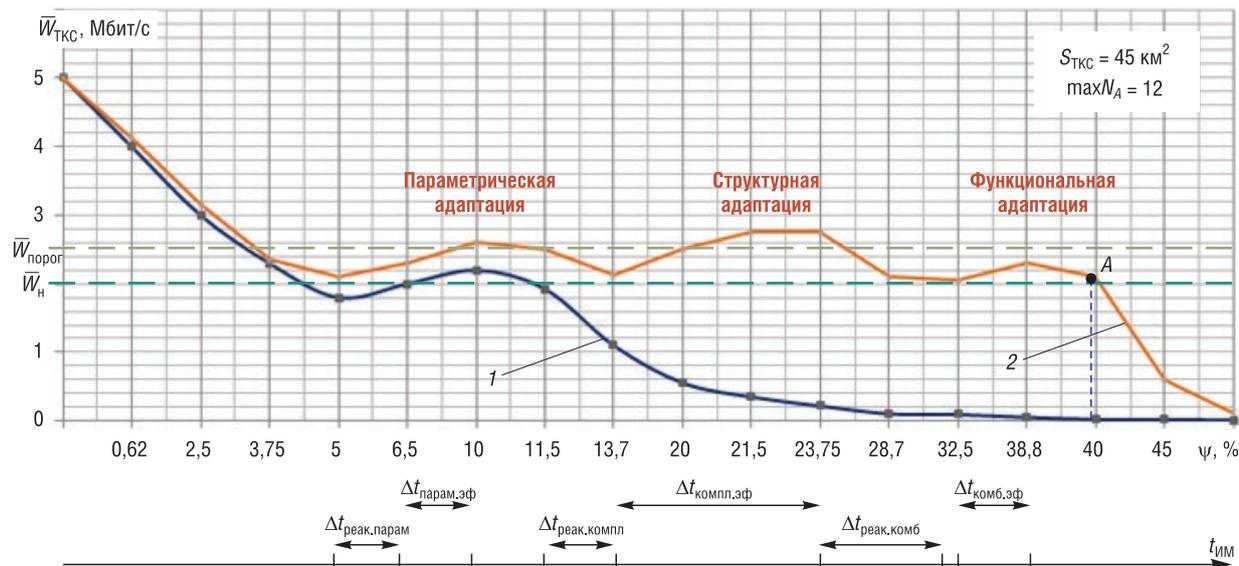


Рис. 2. График зависимости пропускной способности сети связи от интенсивности отказов узловых элементов в транспортной составляющей телекоммуникационной сети при $\max N_A = 12$ и $S_{ТКС} = 45 \text{ км}^2$: 1 – модель существующей телекоммуникационной сети, 2 – модель перспективной адаптивной телекоммуникационной сети

Fig. 2. The schedule of dependence of throughput of a communication network from failure rate of central elements in transport component of a telecommunication network at $\max N_A = 12$ and $S_{ТКС} = 45 \text{ км}^2$: 1 – model of an existing telecommunication network, 2 – model perspective adaptive a telecommunication network

Из данных таблицы следует, что применение комбинированной адаптации в беспроводной ТКС позволяет повысить пропускную способность системы связи в 4–87 раз в зависимости от интенсивности отказов узловых элементов. Такой эффект может быть достигнут за счет осуществления самоорганизации на уровне сетевых устройств, непосредственной адаптации на уровне подсетей.

Следует также отметить, что динамически меняющиеся параметры и функции СУ, структура модели АТКС обеспечивали относительную стабильность информационного обмена между мобильными СУ (достаточную пропускную способность в логических каналах связи).

Заключение. Таким образом, основу представленной методики структурно-параметрического синтеза адаптивной беспроводной телекоммуникационной сети составляет комбинированная адаптация, позволяющая повысить (обеспечить требуемую) пропускную способность системы связи в условиях высокой интенсивности отказов устройств за счет добавления в структуру транспортной составляющей сети необходимого количества избыточных узловых элементов, использования альтернативных способов адресации и маршрутизации, проведения параметрической и функциональной адаптаций в сетевых элементах по критерию их максимальной пропускной способности (минимальному времени задержки пакетов). Также в ходе проведения имитационного эксперимента подтверждена гипотеза о том, что свойство самоорганизации проявляется на уровне сетевых устройств, а непосредственная адаптация может быть осуществлена на уровне подсетей (локальных и магистральных).

Список использованных источников

1. Зализко, А. Ю. Адаптация систем широкополосного абонентского радиодоступа военного назначения / А. Ю. Зализко, И. В. Филипченко // Наука и воен. безопасность. – 2013. – № 4. – С. 22–28.
2. Зализко, А. Ю. Математическая модель перспективной военной системы широкополосного радиодоступа / А. Ю. Зализко // Вестн. Воен. акад. Респ. Беларусь. – 2014. – № 3. – С. 86–97.
3. Бусленко, Н. П. Моделирование сложных систем / Н. П. Бусленко. – М.: Наука, 1978. – 400 с.
4. Григорьев, В. А. Передача сигналов в зарубежных информационно-технических системах / В. А. Григорьев. – СПб.: ВАС, 1998. – 440 с.
5. Разгуляев, Л. Перспективные мобильные адаптивные сети передачи информации для СВ США / Л. Разгуляев // Зарубеж. воен. обозрение. – 2008. – № 1. – С. 35–39.

6. Демин, В. Е. Боевое применение разнородных сил и средств РЭБ в общевойсковом бою / В. Е. Демин, И. И. Королев // Воен. мысль. – 2012. – № 2. – С. 34–40.
7. Математическая модель беспроводной сети передачи данных динамической информационно-управляющей системы / С. В. Кругликов [и др.] // Развитие информатизации и государственной системы научно-технической информации: сб. тез. XVII Междунар. науч.-техн. конф. (РИНТИ-2018), Минск, 20 сент. 2018 г. – Минск, 2018. – С. 291–297.
8. Кругликов, С. В. Экспериментальные исследования подвижной сети широкополосного радиодоступа / С. В. Кругликов, А. Ю. Зализко // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2017. – № 1. – С. 26–34.
9. Григорьев, В. А. Сети и системы радиодоступа / В. А. Григорьев. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 384 с.
10. Основы построения систем и сетей передачи информации: учеб. пособие для вузов / В. В. Ломовицкий [и др.]. – М.: Горячая линия, 2005. – 382 с.
11. Трубецков, Д. И. Введение в теорию самоорганизации открытых систем / Д. И. Трубецков, Е. С. Мchedlova, Л. В. Красичков. – М.: Физматлит, 2005. – 221 с.
12. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: учеб. пособие для вузов / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Высш. шк., 2000. – 480 с.

References

1. Zalizko A. Yu., Filipchenko I. V. Adaptation of military broadband subscriber radio access systems. *Nauka i voennaya bezopasnost'* [Science and Military Security], 2013, no. 4, pp. 22–28 (in Russian).
2. Zalizko A. Yu. Mathematical model of perspective military system of broadband radio access. *Vestnik VoЕННОI akademii Respubliki Belarus'* [Bulletin of the Military Academy of the Republic of Belarus], 2014, no. 3, pp. 86–97 (in Russian).
3. Buslenko N. P. *Simulation of Complex Systems*. Moscow, Nauka Publ., 1978. 400 p. (in Russian).
4. Grigor'ev V. A. *Signal Transmission in Foreign Information Technology Systems*. St. Petersburg, VAS Publ., 1998. 440 p. (in Russian).
5. Razgulyaev L. Promising mobile adaptive information transmission networks for the United STATES. *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign Military Review], 2008, no. 1, pp. 35–39 (in Russian).
6. Demin V. E., Korolev I. I. Combat use of heterogeneous forces and means of EW in combined arms combat. *Voennaya mysl'* = *Military Thought*, 2012, no. 2, pp. 34–40 (in Russian).
7. Kruglikov S. V., Filipchenko I. V., Zalizko A. Yu., Lazarenko V. E. Mathematical model of wireless data transmission network of dynamic information management system. *Razvitie informatizatsii i gosudarstvennoi sistemy nauchno-tekhnicheskoi informatsii: sb. tez. XVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. (RINTI-2018), Minsk, 20 sent. 2018*. [Development of Informatization and the State System of Scientific and Technical Information: Abstracts of the XVII International Scientific and Technical Conference (RINTI-2018), Minsk, 20 Sept. 2018]. Minsk, 2018, pp. 291–297 (in Russian).
8. Kruglikov S. V., Zalizko A. Yu. Experimental studies of the mobile broadband radio access network. *Informacionno-izmeritel'nye i upravlyayushchie sistemy* [Information-Measuring and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 26–34 (in Russian).
9. Grigor'ev V. A. *Radio Access Networks and Systems*. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2005. 384 p. (in Russian).
10. Lomovitskii V. V., Mikhailov A. I., Shestak K. V., Shchekotikhin V. M. *Bases of Construction of Systems and Information Transfer Networks*. Moscow, Goryachaya liniya Publ., 2005. 382 p. (in Russian).
11. Trubeckov D. I., Mchedlova E. S., Krasichkov L. V. *Introduction to the Theory of Self-Organization of Open Systems*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 221 p. (in Russian).
12. Ventcel' E. S., Ovcharov L. A. *Probability Theory and Its Engineering Applications*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 480 p. (in Russian).

Информация об авторах

Кругликов Сергей Владимирович – доктор военных наук, кандидат технических наук, доцент, заместитель генерального директора по научной и инновационной работе, Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси (ул. Сурганова, 6, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Зализко Александр Юрьевич – научный сотрудник, научно-исследовательская лаборатория системных проектов научно-исследовательской части, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, Минск, Республика Беларусь). E-mail: turbostok@tut.by

Information about the authors

Sergey V. Kruglikov – D. Sc. (Military), Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director General for Scientific and Innovative Work, United Institute of Informatics Problems of the National Academy of Sciences of Belarus (6, Surganov Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kruglikov_s@newman.bas-net.by

Aliaksandr Yu. Zalizka – Researcher of the Scientific-Research Part, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., Minsk, Republic of Belarus). E-mail: turbostok@tut.by