

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2020. Т. 65, № 2

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2020. Т. 65, № 2

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

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Г л а в н ы й р е д а к т о р

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь

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

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

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

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

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

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

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

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

Р е д а к ц и о н н ы й с о в е т

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

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

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2020. Т. 65, №2

Выходит на русском, белорусском и английском языках

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

Подписано в печать 25.06.2020. Выход в свет 29.06.2020. Формат 60 × 84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 14,88. Уч.-изд. л. 16,4. Тираж 74 экз. Заказ 113.
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. 2

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 – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

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

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

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

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2020, vol. 65, no. 2

Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

It is sent of the press 25.06.2020. Appearance 29.06.2020. Format 60×84 1/8. Offset paper. The press digital.

Printed pages 14,88. Publisher's signatures 16,4. Circulation 74 copies. Order 113.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Федосюк В. М., Зубарь Т. И., Труханов А. В. Влияние параметров электролитического осаждения на структуру и микромеханические свойства пленок Ni-Fe	135
Стогний А. И., Шарко С. А., Серокурова А. И., Новицкий Н. Н., Поддубная Н. Н., Кецо В. А. Применение барьерных слоев диоксида титана для формирования мультиферроиков ферромагнетик/сегнетоэлектрик ..	145
Богданович А. В. Оценка ресурса труб главного циркуляционного трубопровода АЭС по критерию трещиностойкости с учетом эксплуатационной деградации свойств	153
Тимофеев А. А., Тимошенко В. В., Шутова Е. А., Шаповалов В. М. Физико-механические и технологические характеристики композиционных материалов на основе смесей вторичных термопластов	162
Емельянов В. А., Баранов В. В., Емельянов В. В. Многослойные токопроводящие пленки полупроводниковых приборов и интегральных микросхем	170
Песецкий С. С., Кривогуз Ю. М., Богданович С. П. Влияние способа диспергирования модифицированного слоистого силиката на структуру и свойства смесевых композитов на основе полиамида и функционализированного полиолефина	177

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Пархомчик П. А., Витязь П. А., Егоров А. Н., Моисеенко В. И., Насковец А. М., Харитончик Д. И., Шишко С. А. Новации в создании и обеспечении конкурентоспособности карьерной техники БЕЛАЗ	185
Козерук А. С., Диас Гонсалес Р. О., Филонова М. И., Кузничик В. О., Варопай Е. Н. Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей	197
Дьяконов О. М. Брикетирование структурно-неоднородных пористых материалов	205

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Гуреев М. В., Хабибуллин И. И., Скрыпник А. Н., Маршалова Г. С., Попов И. А., Кадыров Р. Г., Гуреев В. М., Чорный А. Д., Жукова Ю. В. Определение рациональных компоновочных решений для аппарата воздушного охлаждения масла систем смазки компрессорных установок с использованием методов физического и численного моделирования	215
--	-----

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ К 55-летию Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси

Третинников Д. Л., Дойникова А. В., Нагула П. К. Моделирование аварийных процессов, протекающих в защитной оболочке АЭС с водо-водяным энергетическим реактором	224
Едчик И. А., Корбут Т. Н., Кузьмин А. В., Мазаник С. Э., Тогушов В. П., Кравченко М. О. Определение эффективного коэффициента размножения нейтронов подкритической сборки «Яліна-Тепловая»	235
Корчева Ю. А., Горбачева Н. В., Кузьмина Н. Д., Кулич Н. В. Оценка запасов активности по номенклатуре основных радиационно опасных радионуклидов при долговременном обращении с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС	243

УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ

Алексей Владимирович Белый (К 70-летию со дня рождения)	252
Памяти Степана Степановича Песецкого	254

CONTENTS**MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY**

Fedosyuk V. M., Zubar T. I., Trukhanov A. V. Influence of electrodeposition parameters on structure and micro-mechanical properties of thin Ni–Fe films	135
Stognij A. I., Sharko S. A., Serokurova A. I., Novitskii N. N., Poddubnaya N. N., Ketsko V. A. Application of titanium dioxide barrier layers for the ferromagnetic/ferroelectric multiferroics formation	145
Bogdanovich A. V. Estimation of the resource of pipes of the main circulation pipeline of a NPP by the criterion of crack resistance with account of operational degradation of properties	153
Timofeenko A. A., Timoshenko V. V., Shutova E. A., Shapovalov V. M. Physico-mechanical and technological characteristics of composite materials based on mixtures of secondary thermoplastics	162
Emelyanov V. A., Baranov V. V., Emelyanov V. V. Multilayered conductive films of semiconductor devices and integrated circuits	170
Pesetskii S. S., Krivoguz Yu. M., Bogdanovich S. P. Influence of the dispersion method of modified layered silicate on the structure and properties of mixed composites based on polyamide and functionalized polyolefin	177

MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

Parkhomchik P. A., Vityaz P. A., Egorov A. N., Moiseenko V. I., Naskovets A. M., Haritonchik D. I., Shishko S. A. Novations in creation and ensuring the competitiveness of BELAZ quarry machinery	185
Kozeruk A. S., Dias Gonsales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Varopay E. N. Kinematic analysis of the method increasing the accuracy of treatment of conic surfaces	197
Dyakonov O. M. Briquetting of structurally inhomogeneous porous materials	205

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

Gureev M. V., Khabibullin I. I., Skrypnyk A. N., Marshalova G. S., Popov I. A., Kadyrov R. G., Gureev V. M., Chorny A. D., Zhukova Y. V. Use of experimental and numerical simulation methods for rational design of the air cooling apparatus for lubrication systems of compressors	215
--	-----

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS*On the 55th Anniversary of the Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny
of the National Academy of Sciences of Belarus*

Tretinnikov D. L., Doinikova A. V., Nagula P. K. Modeling the emergency processes proceeding in the containment of NPP with water-water energy reactor	224
Edchik I. A., Korbut T. N., Kuzmin A. V., Mazanik S. E., Togushov V. P., Kravchenko M. O. Experimental methods for determining the effective neutron multiplication factor of the “Yalina-Thermal” subcritical assembly	235
Korchova J. A., Harbachova N. V., Kuzmina N. D., Kulich N. V. Assessment of activity resources by nomenclature of main radiation-hazardous radionuclides during the long-term management of spent nuclear fuel of the Belarusian NPP	243

SCIENTISTS OF BELARUS

Alexey Vladimirovich Biely (On the 70 th Anniversary of his birth)	252
In Memory of Stepan Stepanovich Pesetsky	254

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS ENGINEERING, METALLURGY

UDC 539.32;548.526;548.528
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-135-144>

Received 25.03.2020
Поступила в редакцию 25.03.2020

Valeri M. Fedosyuk, Tatiana I. Zubar, Alex V. Trukhanov

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

**INFLUENCE OF ELECTRODEPOSITION PARAMETERS ON STRUCTURE
AND MICROMECHANICAL PROPERTIES OF THIN Ni–Fe FILMS**

Abstract. The correlation between the synthesis modes, chemical composition, crystal structure, surface microstructure, and also the mechanical properties of thin nanostructured Ni – Fe films has been studied. Thin Ni–Fe films on the Si with Au sublayer were obtained using electrolyte deposition with different current modes: direct current and three pulsed modes with pulse duration of 1 s, 10^{-3} and 10^{-5} s. It is shown that a decrease in the pulse duration to 10^{-5} s leads to an increase in the film elastic modulus and the hardness due to the small grain size and a large number of grain boundaries with increased resistance to plastic deformation. The effect of heat treatment at 100, 200, 300, and 400 °C on the surface microstructure and micromechanical properties of the films was investigated. An increase in grain size from 6 to 200 nm was found after heat treatment at 400 °C which, in combination with interdiffusion processes of the half-layer material, led to a significant decrease in hardness and elastic modulus. Ni–Fe films with improved mechanical properties can be used as coatings for microelectronic body for their electromagnetic protection.

Keywords: thin Ni–Fe film, electrodeposition, structure, hardness, elastic modulus

For citation: Fedosyuk V. M., Zubar T. I., Trukhanov A. V. Influence of electrodeposition parameters on structure and micromechanical properties of thin Ni–Fe films. *Vesti Natsyunal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 135–144. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-135-144>

В. М. Федосюк, Т. И. Зубарь, А. В. Труханов

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

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОЛИТИЧЕСКОГО ОСАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ
И МИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК Ni–Fe**

Аннотация. Проведены исследования корреляции между режимами синтеза, химическим составом, кристаллической структурой и микроструктурой поверхности, а также механическими свойствами тонких наноструктурированных пленок Ni–Fe. Тонкие пленки Ni–Fe были получены в различных режимах электролитического осаждения: в режиме постоянного тока и в импульсных режимах с длительностью импульса 1 с, 10^{-3} и 10^{-5} с. Показано, что уменьшение длительности импульса до 10^{-5} с приводит к увеличению модуля упругости и твердости пленок благодаря малому размеру зерна и, соответственно, большому количеству границ зерен с повышенным сопротивлением пластической деформации. Исследовано влияние термической обработки при $T = 100, 200, 300$ и 400 °C на микроструктуру поверхности и микромеханические свойства пленок. После термообработки при 400 °C наблюдалось увеличение размера зерна от 6 до 200 нм, что в сочетании с процессами взаимодиффузии материала подслоя и пленки привело к значительному снижению твердости и модуля упругости. Пленки Ni–Fe с улучшенными механическими свойствами могут быть использованы как покрытия корпусов микроэлектроники для электромагнитной их защиты.

Ключевые слова: тонкие пленки Ni–Fe, электролитическое осаждение, структура, механизм роста, механические свойства

Для цитирования: Федосюк, В. М. Влияние параметров электролитического осаждения на структуру и микро-механические свойства пленок Ni–Fe / В. М. Федосюк, Т. И. Зубарь, А. В. Труханов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 135–144. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-135-144>

Introduction. The development of nanotechnology and the tendency to miniaturization are the main trends of modern scientific and technological progress. Over the past decade, the global market of production and use of thin and nanostructured films has increased by 2–3 times. After applying thin and nanostructured films and coatings, the product surface can acquire new functional properties and, at the same time, its performance characteristics increase [1–3]. Magnetic nanostructured films and separate Ni–Fe nanoparticles are the basis for the development of a new generation of high-density magnetoresistive random access memory, quantum computers, and other topical applications of microelectronics and spintronics [4–6]. In addition, the magnetic properties of nanoparticle ensembles have not yet been sufficiently studied and, therefore, are of interest from fundamental perspective. For example, near the percolation threshold of partially filled nanostructured films, there may occur a magnetic domain structure, ordered in a geometric cluster of single-domain magnetic particles [7]. The appearance of such magnetic structure is due to the peculiarities of the microstructure dipole-dipole and exchange magnetic interactions. In turn, the microstructure features are formed at the stage of film origin and largely depend on the mechanisms of its growth [8–10]. The use of pulsed electrodeposition modes at the synthesis of Ni–Fe nanostructured magnetic films allows controlling the microstructure parameters by controlling the average grain size, the degree of film filling, and the mechanism of its growth, which opens up wide opportunities for the synthesis of films with controlled functional properties [11, 12].

Thus, *the purpose of this work* is to study the effect of the parameters of electrodeposition of thin nanostructured Ni–Fe films on their composition, crystal structure and surface microstructure, as well as on mechanical properties.

Materials and methods of research. Thin Ni–Fe films were synthesized by electrolyte deposition in various modes: stationary electrodeposition (at constant current) and in pulse modes with different pulse durations. The films were deposited on a silicon plate with a crystallographic orientation (100) on a 100 nm thick gold sublayer. Deposition of the films with the desired stoichiometry – Ni₈₀Fe₂₀ – was performed from a standard combined electrolyte composition: NiSO₄ – 210 g/l, NiCl₂ – 20 g/l, H₃BO₃ – 30 g/l, MgSO₄ – 60 g/l, FeSO₄ – 15 g/l, saccharin – 1 g/l. The electrolyte temperature was maintained at 30–35 °C, pH = 2.3–2.5. The current density of $j = 25 \text{ mA/cm}^2$.

The samples of thin Ni–Fe films, obtained by stationary (DC) and pulsed electrodeposition, differed in the pulse duration (t_{on}), which was equal to the pause duration (t_{off}):

- 1) obtained by DC (DC mode), $t_{\text{on}} = t_{\text{full}}$;
- 2) obtained by the long-pulse mode, $t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$;
- 3) obtained by the medium pulse mode, $t_{\text{on}} = 1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$;
- 4) obtained by the short-pulse mode, $t_{\text{on}} = 10 \text{ mcs} = 10^{-5} \text{ s}$.

The total electrodeposition time (t_{full}) was 5, 30 and 60 s for each mode. Table 1 provides details of the synthesis modes of nanostructured Ni–Fe films.

The chemical composition of the research objects was studied using Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX) with spectrometer by Rigaku

Table 1. Features of electrodeposition modes of nanostructured Ni–Fe films obtained with different pulse durations for $t_{\text{full}} = 60 \text{ s}$

Mode	$t_{\text{full}}, \text{ s}$	$t_{\text{on}}, \text{ s}$	$t_{\text{off}}, \text{ s}$	N_u^*	$t_{\text{eff}}, \text{ s}^{**}$
Direct current (DC)	60	60	–	–	60
Long pulse (LP)	60	1	1	30	30
Medium pulse (MP)	60	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	$3 \cdot 10^4$	30
Short pulse (SP)	60	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^6$	30

* N_u – number of current pulses during the full deposition time.

** t_{eff} – effective time of electrodeposition, $t_{\text{eff}} = t_{\text{on}} N_u$.

Inc. Crystal structure and qualitative phase analysis were performed at room temperature using the DRON-3M X-ray diffractometer (XRD) with CuK $_{\alpha}$ ($\lambda = 0.178 \text{ nm}$) in the range of 10–100° in increments of 0.05°. The crystal structure was evaluated using the Rietveld method using the FullProf.

The surface microstructure was studied using the HT-206 atomic force microscope (AFM) and the Hitachi TM3030 scanning electron microscope (SEM).

Micromechanical parameters were measured using the nanoindenter 750 UBI (Hysitron, USA) by introducing the Berkovich diamond pyramid with continuous registration of deformation curves. For each sample, at least 25 measurements were made in the normal load range from 0.1 to 10 mN. Each deformation curve included 4,000 measurements. Loading of materials was carried out according to the scheme “10–10” (10 s of loading, 10 s of unloading). The Oliver–Farr method was used to calculate micromechanical properties [13]. The calculation of the inter-diffusion process of gold atoms into a Ni–Fe film was carried out according to the basic diffusion equation (I Fick’s law) and the Arrhenius equation [14, 15]. The temperature dependence of the diffusion coefficient was determined by the equation 1:

$$D(T) = D_0 \exp\left[-\frac{Q}{T}\right].$$

Where D_0 – factor of diffusion (cm^2/s), Q – activation temperature of the diffusion process corresponding to the activation energy (J/mol), T – thermodynamic temperature (K). For gold atoms diffusing in the film, $D_0 = 1.01 \cdot 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ and $Q = 17,750 \text{ K}$ [16].

Results and discussion. The results of studies of nanostructured films of the Ni–Fe system using EDX (Fig. 1) showed that the Ni/Fe ratio is not constant for samples obtained using different deposition process modes (DC and pulse modes with different pulse durations). The chemical composition of the electrolyte used for electrodeposition was chosen in a way that the stoichiometric ratio of the synthesized films was close to $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$. This alloy has a high magnetic permeability, low coercive force and close to zero magnetostriction, as well as a significant magnetoresistive effect. The composition of the film obtained in DC mode was as close as possible to the predicted one – $\text{Ni}_{79.39}\text{Fe}_{20.61}$.

Switching to pulsed electrodeposition modes provided a deviation from stoichiometry that changed non-linearly with decreasing pulse duration. Fig. 1, *e* shows the change in the stoichiometric ratio of Ni and Fe in films obtained in different electrodeposition modes at $t_{\text{full}} = 60 \text{ s}$. When switching from DC mode to pulse mode with a pulse duration of 1 s and 10^{-3} s , an increase in the iron content from 20.61 to 24.45 at.% is observed. With a further decrease in the pulse duration and switching to the mode with $t_{\text{on}} = 10^{-5} \text{ s}$, a decrease in the iron concentration to 18.24 at.% was recorded.

The chemical composition gradient, exactly, the increase in the iron content in Ni–Fe films near the substrate with subsequent stabilization of the composition, is a known phenomenon found in binary (Ni–Fe, Co–Ni, Co–Fe) and triple (Co–Ni–Fe) alloys obtained by electrodeposition [17, 18]. The stoichiometric ratio in a binary Ni–Fe alloy is determined by the kinetics of the ion reduction process in the cathode fall region. Changing the technological parameters can cause a significant shift in the equilibrium of the

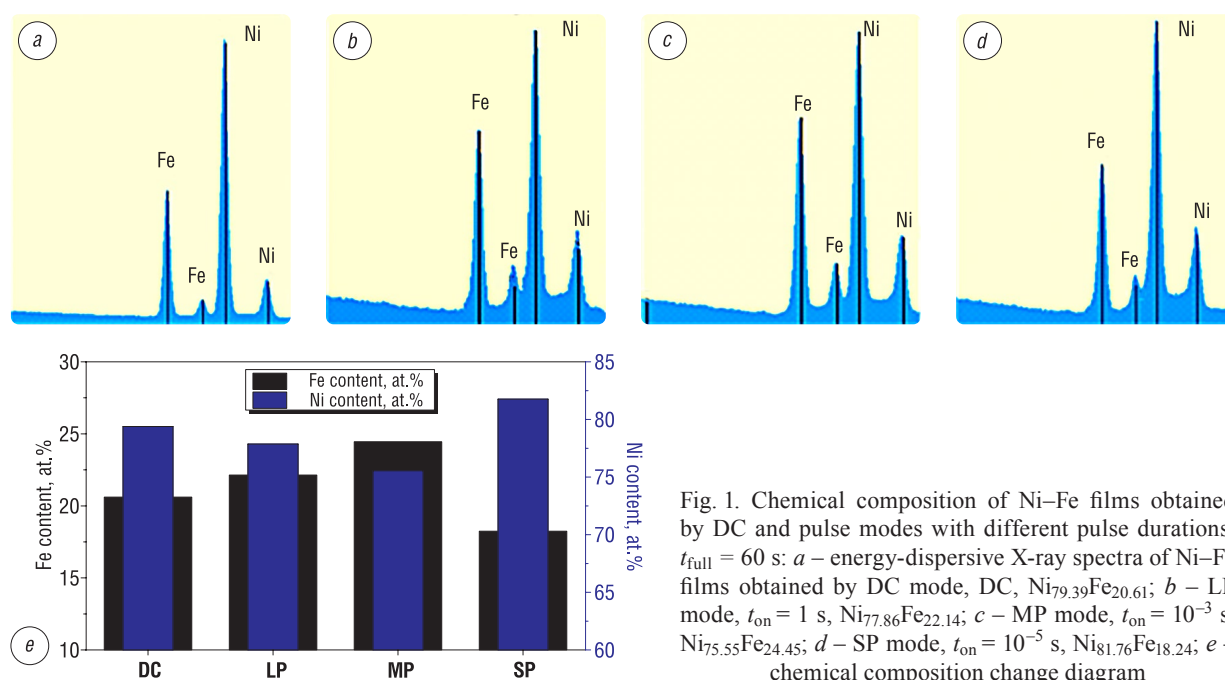


Fig. 1. Chemical composition of Ni–Fe films obtained by DC and pulse modes with different pulse durations, $t_{\text{full}} = 60 \text{ s}$: *a* – energy-dispersive X-ray spectra of Ni–Fe films obtained by DC mode, DC, $\text{Ni}_{79.39}\text{Fe}_{20.61}$; *b* – LP mode, $t_{\text{on}} = 1 \text{ s}$, $\text{Ni}_{77.86}\text{Fe}_{22.14}$; *c* – MP mode, $t_{\text{on}} = 10^{-3} \text{ s}$, $\text{Ni}_{75.55}\text{Fe}_{24.45}$; *d* – SP mode, $t_{\text{on}} = 10^{-5} \text{ s}$, $\text{Ni}_{81.76}\text{Fe}_{18.24}$; *e* – chemical composition change diagram

redox reaction: $\text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^0$, which can lead to a substantial deviation from stoichiometry. For example, an increase in the electrolyte temperature above 40–45 °C contributes to the transition of $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (oxidation). Thus, electrodeposition at electrolyte temperatures $T > 40\text{--}45$ °C results in Ni–Fe films with a lower concentration of iron. The absence of electrolyte mixing during electrodeposition reduces the concentration of Fe^{2+} ions in the cathode region, which also leads to a decrease in the iron content in films with small thicknesses at the initial stages of growth.

In nanostructured films consisting of individual grains, the maximum deviation from stoichiometry is observed at the grain boundaries due to the high content of defects. This can cause a significant difference in the chemical composition at the grain boundary and in the volume. The boundaries of nano-sized grains are characterized by an extremely high density of defects. In addition, when the grain size decreases, the share of their borders increases significantly in relation to the volume.

The use of pulsed electrodeposition provides the growth of the grain structure, with each grain growing within a single pulse. Reducing the pulse duration leads to a decrease in the average grain size, which will be confirmed experimentally later. A decrease in the average grain size leads to an increase in the percentage of grain boundaries and defects. The results of the chemical composition study showed that switching to pulse modes and reducing the pulse duration to $t_{\text{on}} = 10^{-3}$ s causes a decrease in the iron content, and further reducing the pulse duration to $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s leads to an increase in the iron content in the films. Although, for the sample obtained in the mode with the minimum pulse duration, the percentage of defects at the borders should be higher than for the samples obtained with large pulse durations, due to the reduction of grain sizes. From this, it can be concluded that the processes of increasing the iron content during the transition from DC mode to modes with a pulse duration of $t_{\text{on}} \geq 10^{-3}$ s and reducing its content during the transition to a mode with a pulse duration of 10^{-5} s have different natures. This nonlinear change is supposedly the result of a change in the growth mechanism of nanostructured Ni–Fe films using different electrodeposition modes

It can be assumed that the increase in Fe content is the result of the interaction of two competing processes (processes of repolarization in the cathode fall region and increase in nucleation centers). Nevertheless, a decrease in the Fe content for the mode with the minimum pulse duration is the result of non-equilibrium processes of electrolyte depletion by iron ions in the cathode fall region with a simultaneous increase in the number of nucleation centers.

Figure 2 shows diffractograms of Ni–Fe films synthesized with different pulse durations at 60 s of deposition, obtained by XRD. Diffractograms show two distinct peaks for three samples of films obtained by pulsed electrodeposition, while three peaks are observed for the film synthesized in DC mode. The most intense peaks correspond to the angles of $\sim 51\text{--}52$, $\sim 59\text{--}60$ and $\sim 88\text{--}90$ deg. and characterize the atomic planes (111), (200) and (220), respectively. Analysis of diffractograms showed that all the studied samples of Ni–Fe films are single-phase isostructured samples with a cubic lattice and the Fm3m (225) spatial group. With the switching from DC mode to pulse modes and with a decrease in the pulse

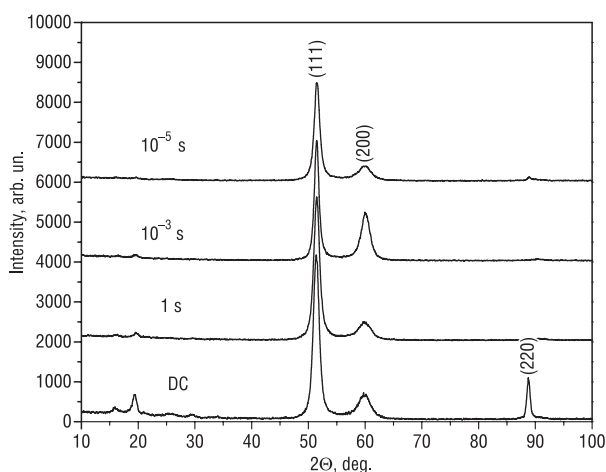


Fig. 2. Diffractograms of Ni–Fe films obtained with different pulse durations, $t_{\text{full}} = 60$ s

duration on diffractograms, there was a decrease in the intensity and an increase in the width of the peaks, which was due to the changes in the content of microdefects and to the decrease in the average size of the crystallite.

Peak corresponding to small angles $\sim 16\text{--}19$ deg. is clearly distinguishable for the film obtained in the DC mode, and switching to the pulse mode with a pulse duration of 1 s, its intensity decreases significantly. This peak is not observed in films synthesized in pulse modes with pulse durations of 10^{-3} and 10^{-5} s. This may indicate an anisotropic form and the presence of a preferred orientation of crystallites in Ni–Fe films synthesized in DC modes and in the mode with the maximum pulse duration. There is also an intense peak at angles of $\sim 88\text{--}90$ deg. that corresponds to

the atomic plane (220) and disappears with the transition to pulse modes, which confirms the isotropic shape of the crystallites and the reduction of the size of the crystallites without a preferred orientation.

Table 2 shows the main crystallographic parameters of film samples obtained in various electrodeposition modes at full deposition time $t_{\text{full}} = 60$ s. The parameter of the unit cell a and the volume of the unit cell V increase when switching to pulsed electrodeposition modes and reducing the pulse duration to 10^{-3} s, and for a sample obtained at $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s, a dramatic decrease in these values is observed. Thus, with an increase in the iron content from 20.61 to 24.45 at.%, the parameter of unit cell a increases from 3.553 to 3.573 Å. This is due to the larger radius of the Fe atom (1.56 Å) compared to Ni (1.24 Å). A significant decrease in the unit cell parameter a from 3.573 to 3.543 Å, observed when the pulse duration decreases from 10^{-3} to 10^{-5} , can be caused not only by a decrease in the Fe concentration in the films, but also by the influence of surface compression of the crystallites. Surface compression of crystallites is observed in nanoscale particles when the proportion of the surface layer is comparable to the proportion of the material in the volume of crystallites. Surface compression can reduce the unit cell parameter.

Table 2. Nominal chemical composition and main crystallographic parameters of Ni–Fe films obtained with different pulse durations, determined by the results of EDX and XRD

Mode	Nominal chemical composition	Unit cell parameter, a , Å	Unit cell volume, V , Å ³	Interplanar spacing, Å		
				d_{111}	d_{200}	d_{220}
DC	Ni _{79.39} Fe _{20.61}	3.553	44.852	2.0513	1.7765	1.2562
LP, $t_{\text{on}} = 1$ s	Ni _{77.86} Fe _{22.14}	3.565	45.308	2.0583	1.7825	1.2604
MP, $t_{\text{on}} = 10^{-3}$ s	Ni _{75.55} Fe _{24.45}	3.573	45.614	2.0629	1.7865	–
SP, $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s	Ni _{81.76} Fe _{18.24}	3.543	44.657	2.0497	1.7675	–

Figure 3 shows the evolution of the surface morphology of Ni–Fe nanostructured films at the initial stages of growth during the transition from DC to pulse modes and when the pulse duration decreases. It was found that with the transition to pulse modes and with a decrease in the pulse duration, the surface becomes more homogeneous, less porous and less defective. The film obtained in DC mode during 60 s of electrodeposition (Fig. 3, *a, b*) had a thickness of 800 ± 70 nm. On the surface there are pores with sizes from hundreds of nanometers to a few units of micrometers and conglomerates of grains with sizes from 100 to 500 nm. The average surface roughness of the Ni–Fe film synthesized in DC mode was $Ra = 17.7 \pm 0.8$ nm. With the transition to the pulse mode of electrodeposition at $t_{\text{on}} = 1$ s, the roughness decreases to the value $Ra = 11.3 \pm 0.7$ nm, and the porosity significantly declines, and the surface uniformity increases (Fig. 3, *c, d*). When the pulse duration is further reduced, the roughness value is reduced to 6.6 and 1.5 nm for the pulsed electrodeposition mode with $t_{\text{on}} = 10^{-3}$ s and $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s, respectively. The results of the AFM surface morphology study correlate well with the data obtained by the SEM method.

The grain size distribution for films produced in different modes is shown in Fig. 4. The most probably diameter of a single grain formed on the surface of a Ni–Fe film in DC mode is 41 nm at $t_{\text{on}} = 1$ s – 20 nm, a film with the most likely grain size of 13 nm is formed in the mode with $t_{\text{on}} = 10^{-3}$ s, and in the mode with $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s – 6 nm.

The decrease in the average grain size is due to a decrease in the duration of the current pulse during electrodeposition. In DC mode, the growth of Ni–Fe system crystallites is performed continuously. This is how films with a developed surface, high roughness and defects are formed. In pulse modes, at the moment of the beginning of the current pulse, an embryo is formed – the center of crystallization, on which the recovery of ions from the electrolyte solution continues for the entire time of the pulse. Grain growth stops when the current is turned off. Thus, the pulse duration determines the size of the film grains.

The surface morphology of films obtained in the mode with a minimum pulse duration of 10^{-5} s, differs significantly from the morphology of samples synthesized in other modes. There are no pores on the surface of the film. The surface is characterized by high uniformity, extremely small grain size and low roughness. The grains formed in the DC mode, long and medium pulse modes have a developed surface and a tendency to form dendrite-like structures, while the grains formed at $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s have the shape of an ellipsoid and form a thin continuous nanostructured film.

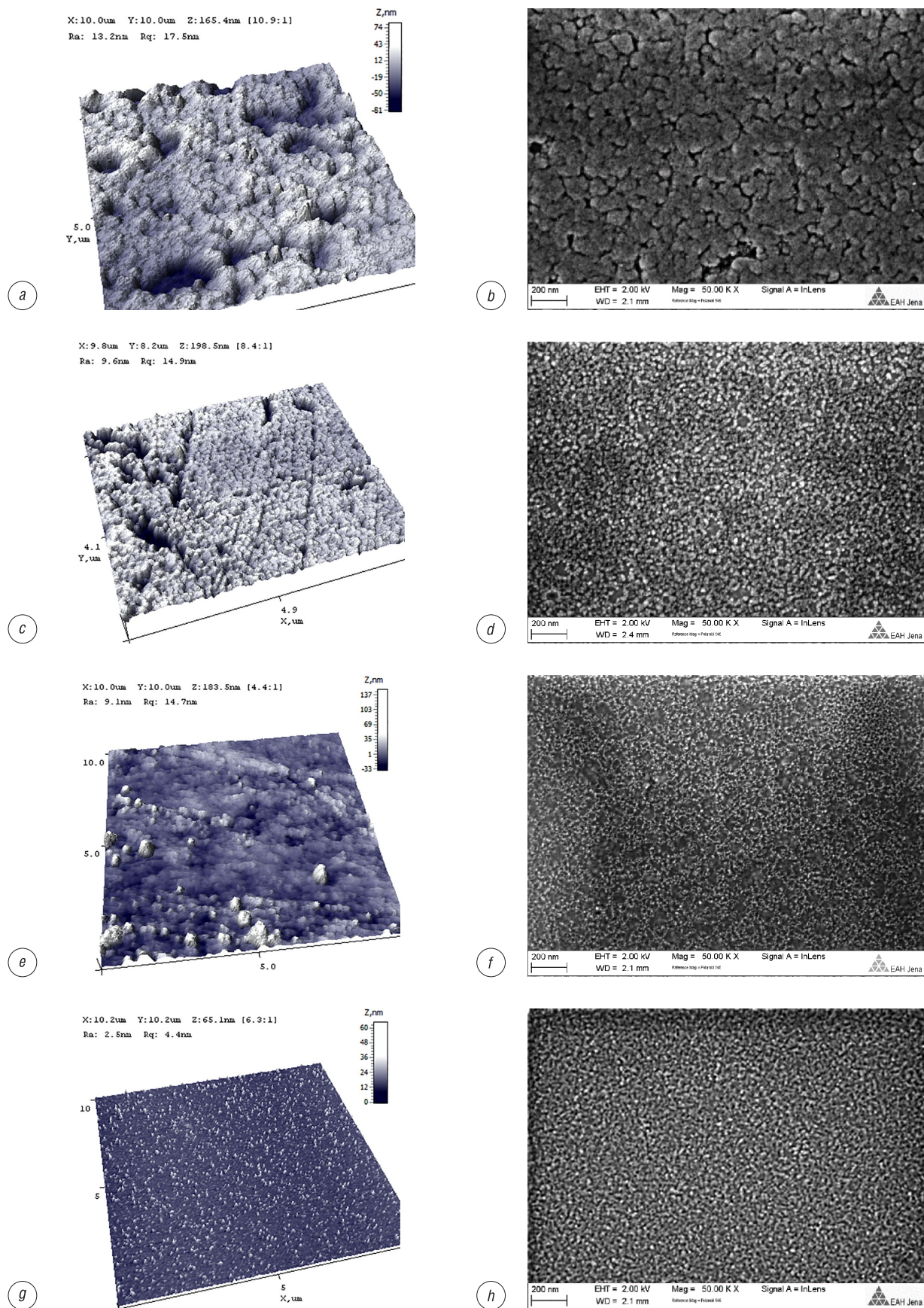


Fig. 3. Results of surface morphology study of nanostructured Ni-Fe films obtained in different electrodeposition modes using AFM (a, c, e, g) and SEM (b, d, f, h): a, b – DC mode; c, d – $t_{on} = 1$ s; e, f – $t_{on} = 10^{-3}$ s; g, h – $t_{on} = 10^{-5}$ s

The distribution of grain sizes by fractions, shown in Fig. 4, shows that films, obtained in the mode with the minimum pulse duration, have a minimum size spread of nanoscale grains. For example, during 5 s of pulsed electrodeposition in the mode with the minimum pulse duration, a film, 85 % of the grains of which are less than 10 nm in size, is formed.

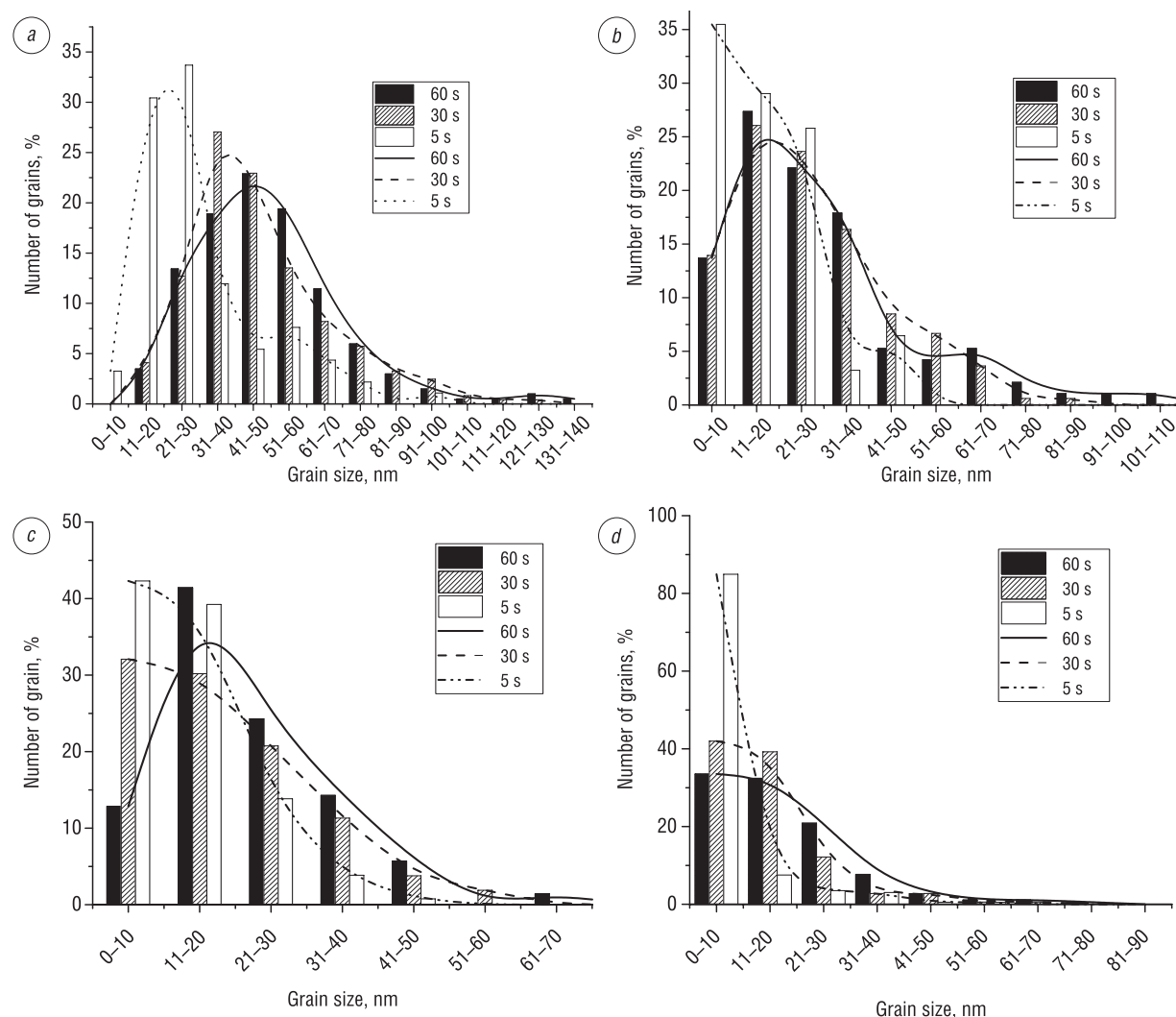


Fig. 4. Grain size distribution of thin Ni-Fe films at the initial stages of growth obtained in different electrodeposition modes: a – DC mode; b – $t_{\text{on}} = 1$ s; c – $t_{\text{on}} = 10^{-3}$ s; d – $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s

The diagrams of changes in the modulus of elasticity (E) and microhardness (H) (Fig. 5) show that experimental samples obtained in DC and pulse modes at $t_{\text{on}} = 1$ s and $t_{\text{on}} = 10^{-3}$ s are characterized by a close value of the modulus of elasticity, ranging from 160 to 162 GPa. Microhardness during the transition from DC mode to pulse mode increased from 6.3 to 7.2 GPa, which is a consequence of reducing the film’s defects and porosity, as well as reducing the average grain size from 40 to 20 nm. When the pulse duration is reduced to 10^{-5} s, there is a significant increase in the modulus of elasticity and microhardness to 189 GPa and 10.8 GPa, respectively. Micromechanical properties are determined by the grain size and the number of grain boundaries. When switching to the mode with the minimum pulse duration, the grain size becomes less than 10 nm and the share of the interface between the grains becomes comparable to the grain volume. In addition, the density increases due to the uniformity of the surface and the cell parameter decreases – in other words, the density of the package increases, which leads to a significant increase in micromechanical properties.

Figure 6 shows the results of the study of the modulus of elasticity and microhardness under the influence of heating. Films formed in the pulse mode at $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s and characterized by maximum micromechanical properties were subjected to heat treatment. After heat treatment at 100, 200, 300, 400 °C, the mi-

micromechanical properties of Ni–Fe nanostructured films decreased. The change in micromechanical properties is due to the influence of many competing processes that are activated when the temperature increases. The greatest contribution is made by the processes of heterodiffusion of the sublayer material (gold) into the permalloy film, as well as intergranular diffusion, which contributes to the homogenization of the material, and recrystallization. At the same time, the surface is being oxidized.

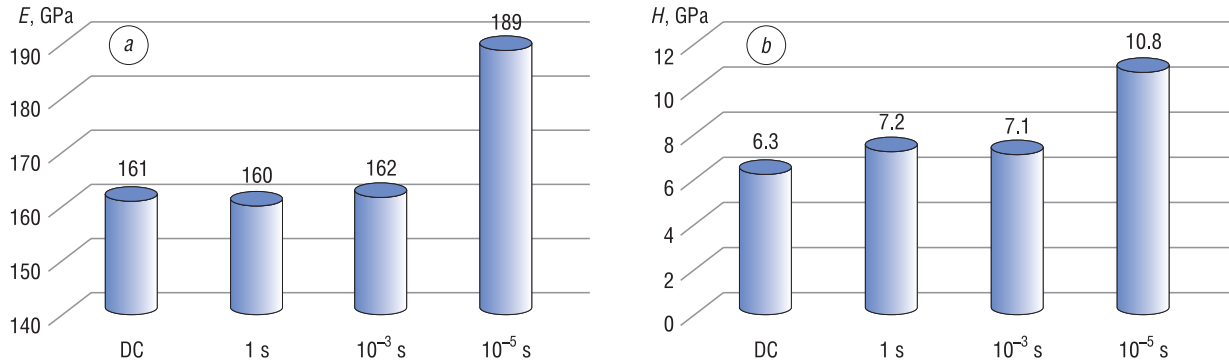


Fig. 5. Micromechanical properties of nanostructured Ni–Fe films obtained in different electrodeposition modes: *a* – modulus of elasticity, *b* – microhardness

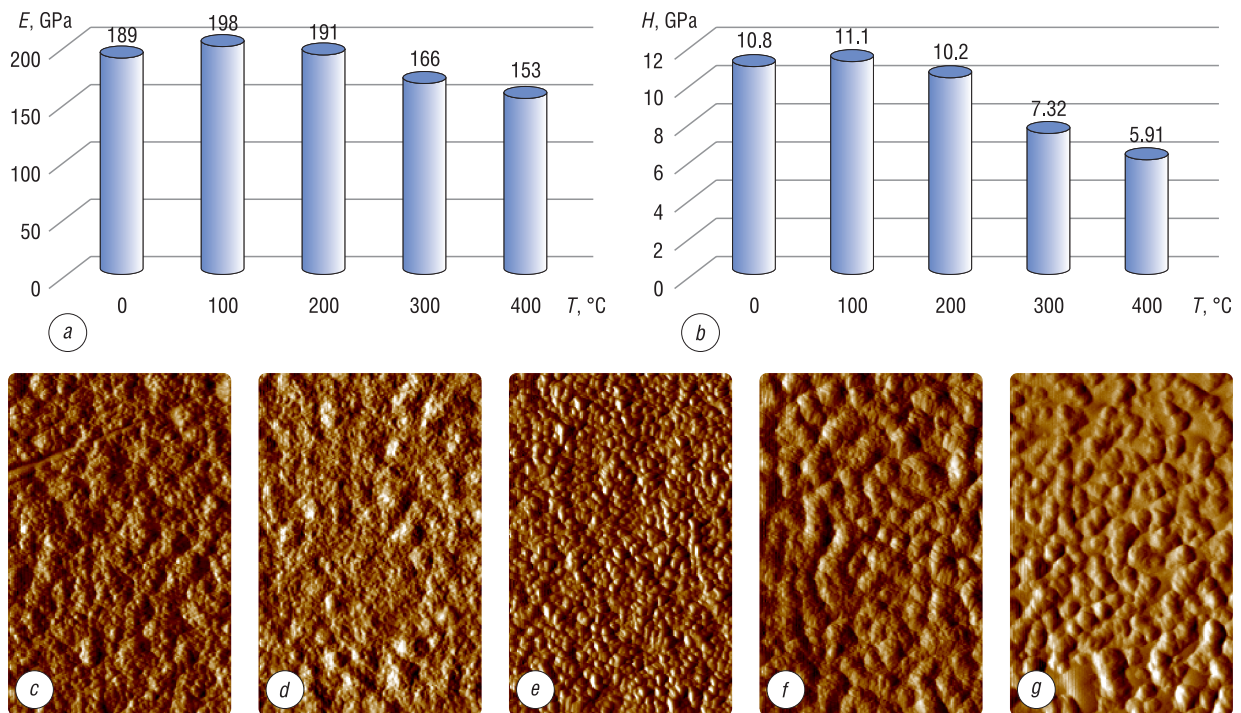


Fig. 6. Effect of heat treatment on the modulus of elasticity, microhardness and microstructure of nanostructured Ni–Fe films obtained by the pulsed electrodeposition mode at $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s: *a* – elastic modulus of the Ni–Fe film obtained by the pulse mode at $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s; *b* – microhardness; *c* – microstructure of the film without heat treatment; *d* – after heat treatment at $T = 100$ °C; *e* – $T = 200$ °C; *f* – $T = 300$ °C; *g* – $T = 400$ °C

Figure 6 shows the change in the mechanical properties and the morphology of the films surface after thermal treatment. When heated, there is a continuous increase in the grain size from 6 nm (at room temperature) to 200 nm at $T = 400$ °C. Detailed analysis of the surface structure indicates that the grain size increases due to unification, which is caused by increased mobility of atoms at the grain boundaries.

Based on the Arrhenius equation and the first Fick law, the temperature-time dependence of the heterodiffusion coefficient of the sublayer material (gold) into the Ni–Fe film was obtained. The results of the calculations are shown in table 3. Taking into account that the values of microhardness and modulus of elasticity are averaged values of the results of nanoindentation over the entire thickness of the film,

the relative concentration of gold in the Ni–Fe layer was also averaged over the entire volume. The change in microhardness and modulus of elasticity is proportional to the number of grain boundaries of the material, as well as the concentration of gold atoms diffusing from the sublayer, which is an additional source of defects.

Analysis of the results showed that heat treatment at 100 °C and 200 °C leads to a slight increase in the modulus of elasticity and microhardness by reducing internal voltages. A further decrease in H and E values is related to an increase in the concentration of gold atoms in the Ni–Fe film, which has lower micromechanical properties. The results of calculating the average relative concentration of gold atoms showed that before reaching the temperature of 300 °C, the relative concentration of gold was negligibly small.

Conclusion. Thin Ni–Fe films on the Si with Au sublayer were obtained using electrolyte deposition with different current modes: direct current and three pulsed modes with pulse duration of 1 s, 10^{-3} and 10^{-5} s. It has been established that a decrease in the pulse duration leads to a decrease in the grain size of the film, an increase in uniformity and a decrease in surface imperfection and porosity. A decrease in t_{on} to 10^{-5} s leads to the formation of grains with an average size of 6 nm. It was established that films obtained with a minimum pulse duration ($t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s) have enhanced mechanical properties. The elastic modulus of this film was 189 GPa, and the hardness was 10.8 GPa, compared with 161 and 6.3 GPa respectively for the film obtained at constant current. It has been shown that the enhancement effect is exerted by a high number of grain boundaries in fine-grained films. This was confirmed by a study of the effect of heat treatment on micromechanical properties. It was established that after heat treatment with $T = 400$ °C, the grain size increased from 6 to 200 nm and the mechanical characteristics simultaneously decreased.

References

1. Milton O. *The Materials Science of Thin Films*. London, Academic Press, 2002. 794 p. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-22199-4>
2. Zangwill A. *Physics at Surface*. Cambridge, Cambridge University Press, 1996. 327 p. <http://dx.doi.org/10.1017/CB09780511622564>
3. Hocking M. G., Vasantasree V., Sidky P. *Metal and Ceramic Coatings*. Longman Scientific & Technical, 1989. 670 p.
4. Kumar C. *Magnetic Nanomaterials*. Weinheim, Wiley-VCH, 2009. 663 p.
5. Morokhov I. D., Trusov L. I., Lapovok V. N. *Physical Phenomena in Ultradisperse Media*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984. 224 p. (in Russian).
6. Suzdalev I. P. *Nanotechnology: Physical Chemistry of Nanoclusters, Nanostructures and Nanomaterials*. Moscow, URSS Publ., 2006. 592 p. (in Russian).
7. Fert A., Cros V., Sampaio J. Skyrmions on the track. *Nature. Nanotechnology*, 2013, vol. 8, no. 3, pp. 152–156. <https://doi.org/10.1038/nnano.2013.29>
8. Huang S., Beyerlein I. J., Zhou C. Nanograin size effects on the strength of biphasic nanolayered composites. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, iss. 1, art. no. 11251. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-10064-z>
9. Yuan R., Beyerlein I. J., Zhou C. Coupled crystal orientation-size effects on the strength of nano crystals. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, iss. 1, art. no. 26254. <https://doi.org/10.1038/srep26254>
10. Guo L., Oskam G., Radisic A., Hoffmann P. M., Searson P. C. Island growth in electrodeposition. *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 44, no. 44, art. no. 443001. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/44/443001>
11. Zubar T. I., Sharko S. A., Tishkevich D. I., Kovaleva N. N., Vinnik D. A., Gudkova S. A., Trukhanova E. L., Trofimov E. A., Chizhik S. A., Panina L. V., Trukhanov S. V., Trukhanov A. V. Anomalies in Ni–Fe nanogranular films growth. *Journal of Alloys and Compounds*, 2018, vol. 748, pp. 970–978. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.03.245>
12. Zubar T. I., Fedosyuk V. M., Trukhanov A. V., Kovaleva N. N., Astapovich K. A., Vinnik D. A., Trukhanova E. L., Kozlovskiy A. L., Zdorovets M. V., Solobai A. A., Tishkevich D. I., Trukhanov S. V. Control of Growth Mechanism of Electrodeposited Nanocrystalline NiFe Films. *Journal of the Electrochemical Society*, 2019, vol. 166, no. 6, D173–D180. <https://doi.org/10.1149/2.1001904jes>
13. Oliver W. C., Pharr G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, vol. 19, no. 1, pp. 3–20. <https://doi.org/10.1557/jmr.2004.19.1.3>

Table 3. Effect of heat treatment on the diffusion of gold atoms from the sublayer into the Ni–Fe film obtained in the pulsed mode at $t_{\text{on}} = 10^{-5}$ s

T , °C	Calculated diffusion coefficient, cm^2/s	Average relative concentration of gold	Average grain size, nm
20	$4.95 \cdot 10^{-30}$	< 0.0001	~ 6
100	$2.18 \cdot 10^{-24}$	< 0.0001	~ 40
200	$5.09 \cdot 10^{-20}$	< 0.001	~ 100
300	$3.56 \cdot 10^{-17}$	~ 0.12	~ 180
400	$3.32 \cdot 10^{-15}$	~ 0.36	~ 200

14. Pavlov P. V., Khokhlov A. F. *Solid State Physics*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2000. 495 p. (in Russian).
15. Gnedenko B. V. *Course of Probability*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 447 p. (in Russian).
16. Koshkin N. I., Shirkevich M. G. Handbook of Elementary Physics. Moscow, Nauka Publ., 1982. 201 p. (in Russian).
17. Zubar T., Trukhanov A., Vinnik D., Astapovich K., Tishkevich D., Kaniukov E., Kozlovskiy A., Zdorovets M., Trukhanov S., Features of the Growth Processes and Magnetic Domain Structure of NiFe Nano-objects, *Journal of Physical Chemistry C*, vol. 123, no. 44, pp. 26957–26964. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.9b06997>
18. Gong J., Riemer S., Kautzky M., Tabakovic I. Composition gradient, structure, stress, roughness and magnetic properties of 5–500 nm thin NiFe films obtained by electrodeposition. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2016, vol. 398, pp. 64–69. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.09.036>
19. Min Y., Akbulut M., Kristiansen K., Golan Y., Israelachvili J. The role of interparticle and external forces in nanoparticle assembly. *Nature Materials*, 2008, vol. 7, iss. 7, pp. 527–538. <https://doi.org/10.1038/nmat2206>

Information about the authors

Valeri M. Fedosyuk – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Physics and Mathematics), General Director, 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: fedosyuk@physics.by

Tatiana I. Zubar – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, 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: fix.tatuana@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>

Alex V. Trukhanov – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, 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: truhanov86@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3430-9578>

Информация об авторах

Федосюк Валерий Михайлович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, генеральный директор, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fedosyuk@physics.by

Зубарь Татьяна Игоревна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fix.tatuana@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>

Труханов Алексей Валентинович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: truhanov86@mail.ru. <https://orcid.org/0000-0003-3430-9578>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 537.635:538.935:539.216:621.793.18

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-145-152>

Поступила в редакцию 13.12.2019

Received 13.12.2019

А. И. Стогний¹, С. А. Шарко¹, А. И. Серокурова¹, Н. Н. Новицкий¹, Н. Н. Поддубная²,
В. А. Кецо³

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

²Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси, Витебск, Республика Беларусь

³Институт общей и неорганической химии Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

ПРИМЕНЕНИЕ БАРЬЕРНЫХ СЛОЕВ ДИОКСИДА ТИТАНА ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ МУЛЬТИФЕРРОИКОВ ФЕРРОМАГНЕТИК/СЕГНЕТОЭЛЕКТРИК

Аннотация. С помощью метода ионно-лучевого распыления – осаждения получены слоистые мультиферроики Co/PZT (PZT – сегнетоэлектрическая керамика на основе цирконата титаната свинца состава $PbZr_{0,45}Ti_{0,55}O_3$ с термостабильным плоскопараллельным интерфейсом сегнетоэлектрик/ферромагнетик), обладающие воспроизводимыми низкочастотными магнитоэлектрическими характеристиками при комнатной температуре. Методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) поперечного сечения исследована граница раздела слоя кобальта толщиной до нескольких микрон с толстой керамической подложкой цирконата – титаната свинца. Показано, что использование барьерного слоя диоксида титана TiO_2 вместо PZT позволяет добиться улучшения качества интерфейса за счет уменьшения длительности ионно-лучевой планаризации сегнетоэлектрической подложки, а также исключить образование промежуточных химических соединений. На основе данных рентгенофазового анализа (РФА) сделан вывод об аморфности слоя TiO_2 , который по сравнению с кристаллическим позволяет более равномерно, без искажений, передавать внутренние напряжения, возникающие между сегнетоэлектрической подложкой и ферромагнитным слоем. Это приводит к более эффективному магнитоэлектрическому взаимодействию и значительному по величине (в единицы – десятки мВ/А) низкочастотному магнитоэлектрическому эффекту при комнатной температуре. Магнитоэлектрические измерения показали, что использование диоксида титана вместо PZT при соответствующих режимах планаризации приводит к увеличению низкочастотного магнитоэлектрического эффекта до 5 мВ/(см·Э) по сравнению со структурами с напылением планаризирующего слоя PZT, где величина данного эффекта составляет 2 мВ/(см·Э). Эти результаты позволяют улучшить характеристики указанных структур при использовании в качестве чувствительных элементов в устройствах формирования – обработки информации и датчиков магнитного поля на основе магнитоэлектрического эффекта.

Ключевые слова: ионно-лучевое распыление – осаждение, слоистые мультиферроики, интерфейс ферромагнетик/сегнетоэлектрик, ионно-лучевая планаризация поверхности, барьерный слой, сегнетоэлектрическая подложка, магнитоэлектрический эффект, магнитоэлектрический коэффициент по напряжению

Для цитирования: Применение барьерных слоев диоксида титана для формирования мультиферроиков ферромагнетик/сегнетоэлектрик / А. И. Стогний [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 145–152. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-145-152>

Aleksandr I. Stognij¹, Sergei A. Sharko¹, Aleksandra I. Serokurova¹, Nikolay N. Novitskii¹, Natalya N. Poddubnaya², Valerii A. Ketsko³

¹Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

²Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Science of Belarus, Vitebsk, Republic of Belarus

³Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

APPLICATION OF TITANIUM DIOXIDE BARRIER LAYERS FOR THE FERROMAGNETIC/FERROELECTRIC MULTIFERROICS FORMATION

Abstract. The layered multiferroics Co/PZT were obtained by ion-beam sputtering-deposition method, where PZT is a ferroelectric ceramic based on lead titanate zirconate of the composition $PbZr_{0,45}Ti_{0,55}O_3$ with a thermostable plane-parallel ferroelectric/ferromagnet interface. Using cross-sectional scanning electron microscopy (SEM), we studied the interface of a cobalt layer up to several micrometers thick with a thick ceramic substrate of lead zirconate titanate. It has been shown that the use of a titanium dioxide barrier layer of TiO_2 instead of PZT allows quality improvement of the interface by reducing the duration of ion-beam planarization of the ferroelectric substrate, and also to eliminate the formation of intermediate chemical compounds. Based on the data of X-ray phase analysis (XRD), it was concluded that the TiO_2 layer is amorphous. Magnetolectric measurements have shown that the use of titanium dioxide instead of PZT under appropriate planarization

modes can increase the low-frequency magnetoelectric effect to 5 mV/(cm·Oe), compared with structures with a sputtering planarizing layer of PZT, where the magnitude of the low-frequency magnetoelectric effect is 2 mV/(cm·Oe). These results allow us to improve the characteristics of these structures when used as sensitive elements in devices for formation – processing of information and magnetic field sensors based on the magnetoelectric effect.

Keywords: ion-beam sputtering – deposition, layered multiferroics, ferromagnetic/ferroelectric interface, ion-beam planarization of the surface, barrier layer, ferroelectric substrate, magnetoelectric effect, magnetoelectric voltage coefficient

For citation: Stognij A. I., Sharko S. A., Serokurova A. I., Novitskii N. N., Poddubnaya N. N., Ketsko V. A. Application of titanium dioxide barrier layers for the ferromagnetic/ferroelectric multiferroics formation. *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. 2, pp. 145–152 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-145-152>

Введение. В настоящее время большой интерес вызывают мультиферроики на основе композиционных систем в виде слоистых структур ферромагнетик/сегнетоэлектрик [1–3]. Существующий в них магнитоэлектрический (МЭ) эффект достигает гигантских значений в сотни – тысячи мВ/(см·Э) при комнатной температуре [4, 5], что значительно выше, чем в однофазных материалах [4–6]. Это позволяет создавать сверхбыстрые МЭ преобразователи и высокочувствительные датчики магнитных полей, не требующие для своей работы внешних источников электрической энергии.

Значительный интерес представляют собой слоистые структуры Со/ЦТС, где ЦТС – сегнетоэлектрическая (СЭ) керамика на основе цирконата – титаната свинца состава $PbZr_{0,45}Ti_{0,55}O_3$. Материалы на основе ЦТС обладают высокими СЭ характеристиками (остаточная поляризация, пьезомодуль, механическая добротность). Кобальт как ферромагнитный (ФМ) металл является наиболее изученным модельным объектом с установленными режимами получения.

Большинство существующих в настоящее время методов формирования слоистых композитных структур основано на механическом соединении слоев сегнетоэлектрика и ферромагнетика, например, путем склеивания [4, 7, 8]. Наличие клеевого слоя на границе раздела (интерфейсе) ферромагнетик/сегнетоэлектрик, толщина которого варьируется от одного до нескольких микрометров, значительно ослабляет МЭ взаимодействие между компонентами. Кроме того, это снижает воспроизводимость и контролируемость МЭ эффекта, особенно при повышенных температурах. Несмотря на большие значения МЭ коэффициента в данных структурах [4], указанные выше недостатки являются принципиальными и не допускают возможности обработки этих структур методами микроэлектроники.

Применение метода ионно-лучевого распыления – осаждения [9] позволяет устранить данные недостатки путем непосредственно нанесения слоя ФМ металла на СЭ подложку после предварительной ионно-лучевой планаризации поверхности подложки. Это дает возможность отказаться от традиционно используемых способов механического соединения [4, 6, 10] и непосредственно формировать термостабильный плоскопараллельный интерфейс и получать композиционные мультиферроики ферромагнетик/сегнетоэлектрик с МЭ эффектом при комнатной температуре.

В предыдущих наших работах [9, 11] было показано, что в случае структур, полученных напылением ФМ слоев ионно-лучевым методом на подложки СЭ керамики на основе ЦТС, образуется прямой контактный металлический слой /подложка. При этом в формировании низкочастотного МЭ эффекта основной вклад вносят очень малые области по обе стороны от интерфейса толщиной, составляющей $\approx 0,005–0,010$ от толщины подложки, сравнимые с толщиной ФМ слоя, что позволило предложить концепцию интерфейсного МЭ эффекта.

Получение гладких термостабильных интерфейсов сопряжено с определенными трудностями, связанными с большой шероховатостью поверхности керамических материалов, которая достигает величин порядка 1 мкм. Для решения этой проблемы был разработан двухстадийный метод ионно-лучевой планаризации поверхности сегнетокерамики [11] с применением планаризирующих слоев. Однако при использовании планаризирующих слоев на основе ЦТС продолжительность планаризации может достигать нескольких часов.

Целью данной работы является получение качественных слоистых структур ферромагнетик/сегнетоэлектрик за счет применения диоксида титана TiO_2 в качестве планаризирующего слоя вместо ЦТС. Диоксид титана является близким по составу с подложкой и имеет более высокое

значение коэффициента распыления по сравнению с ЦТС. Это позволит значительно сократить время планаризации и, кроме того, избежать образования промежуточных фаз между ФМ и СЭ слоями. Все это способствует улучшению МЭ свойств мультиферроика Co/ЦТС.

Методика эксперимента. СЭ керамика на основе ЦТС состава $\text{PbZr}_{0,45}\text{Ti}_{0,55}\text{O}_3$ синтезировалась в виде таблеток диаметром 8 мм и толщиной 400 мкм по стандартной технологии методом твердофазного синтеза [12, 13] путем спекания порошкообразных оксидов ZrO_2 , TiO_2 и PbO , взятых в соответствующей пропорции, прессованных под давлением $2 \cdot 10^8$ Па. Поверхность образцов последовательно обрабатывалась методами механохимического полирования и ионно-лучевого распыления – осаждения с целью доведения ее среднеквадратической шероховатости до субмикронного уровня [9].

Утонение исходных подложек до заданной толщины в 400 мкм выполнялось последовательно сменяемыми в процессе механического шлифования наждачными смесями с абразивными порошками М-40, М-20 и М-10 (ГОСТ 3647-80) на первом этапе и полировальными смесями с алмазными порошками АСМ-5/3, 3/2, 2/1 (ГОСТ 9206-80) на последующих этапах с промежуточным контролем толщины при помощи микрометра. Финишное механохимическое полирование производилось посредством алмазного порошка АСМ-1/0,5 в среде натурального воска.

Поверхность подложки ЦТС подвергалась двухэтапной операции ионно-лучевой планаризации. На первом этапе производилось напыление планаризирующего слоя ЦТС либо диоксида титана TiO_2 толщиной 0,2 мкм посредством распыления соответствующей мишени ионами кислорода с энергиями 1,2–1,4 кэВ в течение 45 мин. На втором этапе поверхность подложки с напыленным слоем подвергалась распылению ионами кислорода с энергией 0,4 кэВ на глубину, в 2 раза превышающую толщину планаризирующего слоя. Распыление слоя ЦТС совершалось в течение 180 мин. Причем для достижения такого же сглаживающего эффекта при распылении поверхностной структуры со слоем TiO_2 требовалось 30 мин.

Затем на планаризованную поверхность керамической подложки наносили слой ФМ металла со скоростью 1,1 мкм/ч методом ионно-лучевого распыления кобальтовой мишени ионами аргона с энергией 1,4 кэВ [9, 11]. При этом рабочее давление аргона в камере составляло 0,1 Па.

МЭ измерения проводились при комнатной температуре в постоянном и переменном магнитных полях по методике, описанной в [12, 14, 15]. В качестве МЭ отклика принимался МЭ коэффициент по напряжению α (мВ/А).

Анализ поперечных сечений гетероструктур выполнялся на растровом электронно-ионном микроскопе РЭМ Helios NanoLab 600 производства FEI Company (США). Для получения резов поперечного сечения с помощью сфокусированных ионных пучков использовались ионы галлия с энергией 32 кэВ. Естественные сколы получались методом раскалывания в вакууме в камере электронного микроскопа.

Рентгеновские исследования проводились на дифрактометре ДРОН-3 с использованием характеристического излучения на линии $\text{CuK}\alpha$ с длиной волны 1,5405 Å. Рентгеновские лучи направлялись на гетероструктуру Co/ TiO_2 /ЦТС со стороны слоя кобальта. При шаге сканирования $0,03^\circ$ время сбора данных в точке составляло 3 с. Рефлексы идентифицировались с использованием базы данных ICSD (Inorganic Crystal Structure Database).

Толщины металлических слоев определялись с помощью интерференционного микроскопа Линника–Номарски МИИ 4 и по данным растровой электронной микроскопии (РЭМ).

Результаты и их обсуждение. Метод ионно-лучевой планаризации поверхности сегнетокерамики состоит в том, что на первом этапе на поверхность подложки ЦТС напыляется планаризирующий слой посредством распыления мишени, соответствующей ему по стехиометрическому составу. Толщина планаризирующего слоя составляет около половины значения среднеквадратической шероховатости исходной поверхности. При этом происходит преимущественное заполнение впадин рельефа поверхности осаждаемым материалом, в частности за счет его сползания с вершин выступов во впадины, когда выступы практически не растут, а впадины заполняются. Далее производится ионно-лучевое распыление поверхности ионами кислорода в течение времени, превышающем время распыления осажденного слоя. Вследствие угловой анизотропии коэффициента распыления, выступающие части кристаллитов распыляются интенсивнее плоских участков поверхности. Это приводит к сглаживанию рельефа поверхности в целом.

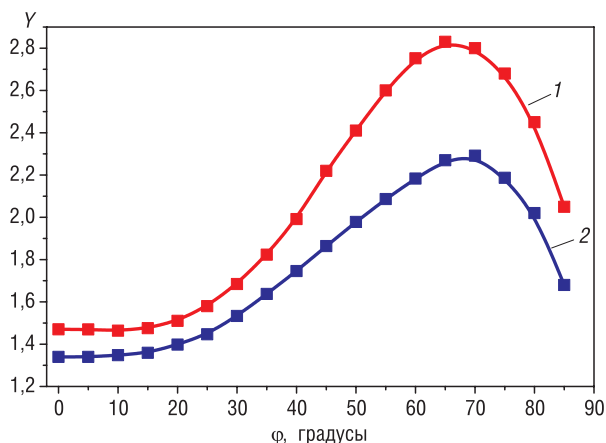


Рис. 1. Угловая зависимость коэффициента распыления ионами кислорода с энергией 0,4 кэВ для TiO_2 (1) и $\text{PbZr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55}\text{O}_3$ (2) по результатам моделирования с помощью программы SRIM

Fig. 1. The angular dependence of the sputtering coefficient of oxygen ions with an energy of 0.4 keV for TiO_2 (1) and $\text{PbZr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55}\text{O}_3$ (2) according to the simulation results using the SRIM program

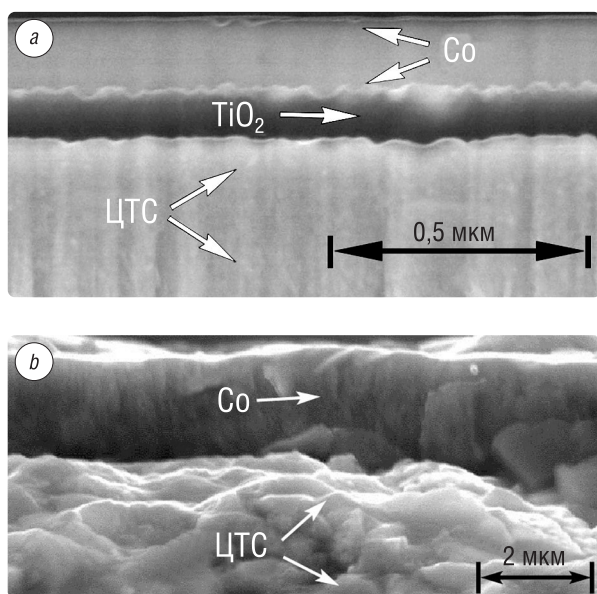


Рис. 2. Характерный вид образца $\text{Co}/\text{TiO}_2/\text{ЦТС}$ в области реза поперечного сечения (a) и поперечный рез образца $\text{Co}/\text{ЦТС}$ после процесса планаризации поверхности ЦТС подложки с помощью слоя ЦТС (b)

Fig. 2. A typical view of the $\text{Co}/\text{TiO}_2/\text{PZT}$ sample in the cross-section cut region (a), and the cross-section cut of the Co/PZT sample after the planarization of the surface of the PZT substrate using the PZT layer (b)

материала друг к другу и несовершенного вследствие этого сопряжения межзеренных границ, как и рассмотренные выше факторы, значительно затрудняет передачу МЭ взаимодействий.

На рис. 2, a показан поперечный рез образца Co (0,3 мкм)/ TiO_2 (0,1 мкм)/ЦТС (400 мкм), выполненный с помощью фокусированных ионов. Для сравнения на рис. 2, b представлено поперечное сечение в области естественного скола образца Co (2 мкм)/ЦТС (400 мкм), полученного в результате планаризации поверхности ЦТС подложки с помощью слоя, идентичного по составу

С помощью известной программы SRIM [16] было проведено моделирование процессов распыления материала керамики ЦТС состава $\text{PbZr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55}\text{O}_3$ и диоксида титана TiO_2 ионами кислорода с энергиями 0,4 кэВ в зависимости от угла падения ионов в условиях, наиболее приближенных к экспериментальным (рис. 1). Угол падения ионов отсчитывается от нормали к облучаемой поверхности. Взаимное расположение источника распыляющих ионов и подложкодержателя с облучаемым материалом обеспечивает нормальное падение ионов на плоскую поверхность подложки. На выступах и других неровностях поверхности этот угол отличен от нуля. Угловая зависимость коэффициента распыления Y с максимумом в области больших углов приводит к интенсивному распылению более острых выступов по сравнению с плоскими участками поверхности. Сравнение же обоих графиков показывает, что разница в коэффициентах распыления для TiO_2 на выступах и на плоских участках больше, чем для $\text{PbZr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55}\text{O}_3$, тогда как коэффициенты распыления плоских участков в обоих случаях незначительно отличаются друг от друга. Это означает более интенсивное распыление выступов в случае TiO_2 относительно ЦТС. Такой прием позволяет получить гладкие плоскопараллельные интерфейсы (рис. 2, a) по сравнению со структурой, полученной с помощью планаризации слоев, идентичным по составу с подложкой (рис. 2, b).

Гладкость интерфейса предполагает отсутствие зон несплошности, вспучиваний и отслоений, нарушающих контакт металла с подложкой. Наличие таких областей может быть обусловлено, во-первых, несоответствием параметров кристаллических решеток; во-вторых, различием в коэффициентах теплового расширения контактирующих материалов; наконец, несплошностью поверхности керамики на субмикронном уровне. Влияние второго и третьего факторов существенно сказывается при термоциклировании.

Образование полостей из-за неплотного прилегания кристаллитов керамического ма-

с подложкой. В отличие от рис. 2, *a*, здесь граница раздела между слоем кобальта и подложкой ЦТС не является такой же гладкой.

На изображении рис. 2, *a* отчетливо различаются три области. Верхняя область относится к слою кобальта толщиной 0,3 мкм, нижняя представляет собой керамическую подложку ЦТС. Видно, что структура имеет непрерывные плоскопараллельные интерфейсы, без каких-либо дефектов, связанных с взаимодействием между буферным слоем и подложкой. Между слоем кобальта и подложкой имеется непрерывная темная полоса диоксида титана TiO_2 толщиной 0,1 мкм, который находится в аморфном состоянии, о чем свидетельствует отсутствие его рефлексов на рентгенограмме гетероструктуры ЦТС (400 нм)/ TiO_2 (0,1 мкм)/Co (0,5 мкм) (рис. 3). Такое малое количество материала TiO_2 не может значительно повлиять на структуру как самой поверхности подложки, так и находящихся на ней слоев металла. Диоксид титана входит в состав керамики ЦТС в качестве одного из компонентов твердого раствора, поэтому он не образует каких-либо посторонних фаз с подложкой в виде химических соединений и препятствует их образованию между слоем кобальта и подложкой.

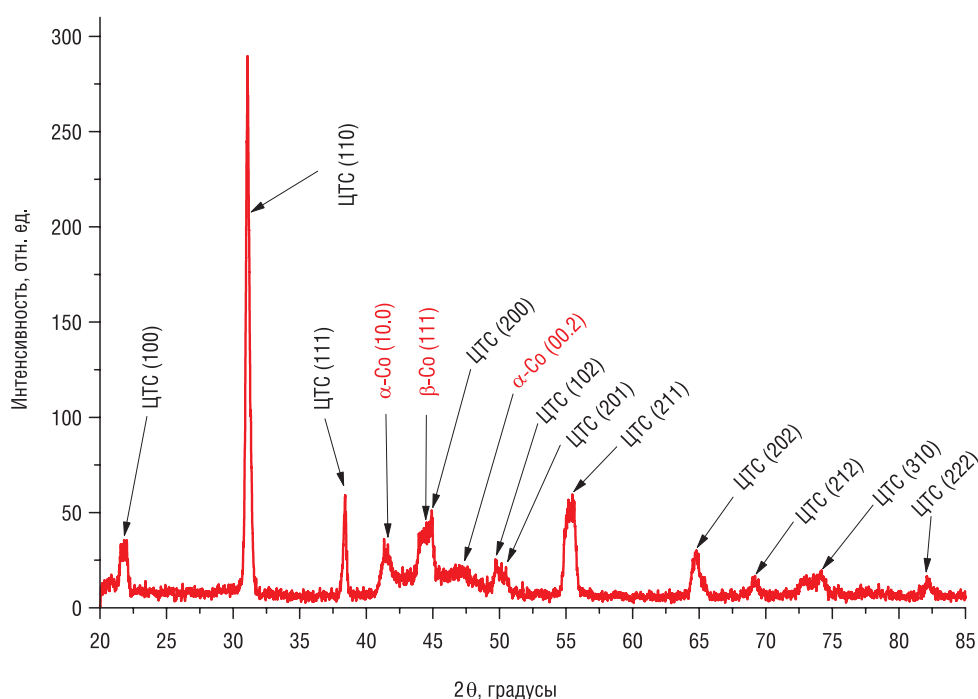


Рис. 3. Рентгенограмма структуры Co/ TiO_2 /ЦТС
Fig. 3. X-ray diffraction pattern of Co/ TiO_2 /PZT structure

На рентгенограмме (рис. 3) в области малоугловых рефлексов кобальта (40° – 50°) имеется размытие дифракционных максимумов, появление которого связывается с напряженным состоянием слоя металла на поверхности сегнетокерамической подложки. В этой области наблюдаются рефлексы от кобальта (10.0) и (111), принадлежащие, соответственно, ГПУ и ГЦК фазам, и совсем не виден рефлекс (00.2) от ГПУ фазы. Рефлекс от кобальта (111) очень близок к рефлексу от подложки (200).

Дифракционное размытие имеется там, где в непосредственной близости располагаются рефлексы от металла и подложки. В подтверждение этому три характерных малоугловых рефлекса от подложки (100), (110) и (111) в области углов 2θ 20° – 40° вдали от рефлексов кобальта не размыты. Об этом также свидетельствует тот факт, что на рентгенограмме подложки ЦТС без осажденного слоя кобальта никакого размытия дифракционных пиков в указанной угловой области не наблюдалось [17]. Слой кобальта и непосредственно примыкающие к нему области подложки упруго связаны друг с другом посредством сильной адгезии, возникающей на интерфейсе при ионно-лучевом воздействии на подложку. Упругая механическая связь проявляется в непрерывном изменении параметров кристаллической решетки металла, что и наблюдается на рентгенограмме.

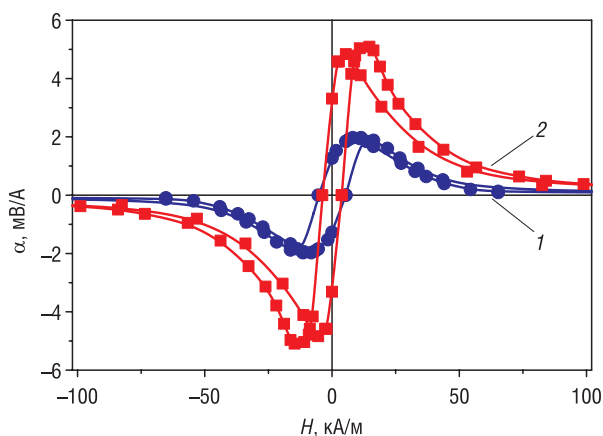


Рис. 4. Кривые МЭ гистерезиса образцов слоистых структур Co/ЦТС/Co с напылением планаризирующего слоя ЦТС в течение 45 мин и его распыления в течение 3 ч (1), и с напылением планаризирующего слоя TiO₂ в течение 60 мин и его распыления в течение 30 мин (2)

Fig. 4. ME hysteresis curves of Co/PZT/Co layered structures with sputtering of a planarizing PZT layer for 45 min and its sputtering for 3 hours (1), and with sputtering of a planarizing TiO₂ layer for 60 min and its sputtering for 30 min (2)

(кривая 1), и соответствующая зависимость для аналогичной структуры, в которой планаризирующий слой TiO₂ напылялся в течение 60 мин и затем распылялся на протяжении 30 мин (кривая 2). Как видно из рисунка, использование диоксида титана вместо ЦТС при соответствующих режимах планаризации приводит к двукратному увеличению МЭ коэффициента по напряжению.

Заключение. Таким образом, в данной работе продемонстрировано улучшение МЭ свойств слоистых структур Co/ЦТС за счет применения барьерного слоя диоксида титана TiO₂. Замена слоя ЦТС слоем TiO₂ при планаризации поверхности СЭ подложки ЦТС приводит к получению более гладкой поверхности подложки за меньшее время планаризации. С другой стороны, использование слоя TiO₂ позволяет формировать более резкие границы ФМ металл/СЭ подложка, исключая образование посторонних химических соединений между ФМ и СЭ компонентами. Это позволяет сформировать на СЭ подложке сплошной качественный ФМ слой и улучшить МЭ свойства структуры ФМ металл/СЭ подложка. Данные структуры могут найти применение в качестве сенсорных элементов датчиков магнитных полей на основе МЭ эффекта.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований и Российского фонда фундаментальных исследований в рамках совместных проектов Ф18Р-086, Ф18Р-087, Ф18Р-244 на 2018–2020 гг. и грантов Российского фонда фундаментальных исследований № 19-08-00643 и 18-29-11026.

Acknowledgements

The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research and the Russian Foundation for Fundamental Research (projects F18R-086, F18R-087, F18R-244 for 2018–2020). And grants of the Russian Foundation for Basic Research No. 19-08-00643 and 18-29-11026.

Список использованных источников

1. Пятаков, А. П. Магнитоэлектрические материалы и мультиферроики / А. П. Пятаков, А. К. Звездин // Успехи физ. наук. – 2012. – Т. 182, № 5. – С. 593–620. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0182.201206b.0593>
2. Белоус, А. Г. Мультиферроики: синтез, структура и свойства / А. Г. Белоус, О. И. Вьюнов // Украин. хим. журн. – 2012. – Т. 78, № 7. – С. 41–70.
3. Смоленский, Г. А. Сегнетомагнетики / Г. А. Смоленский, И. Е. Чупис // Успехи физ. наук. – 1982. – Т. 137, № 4. – С. 415–448. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0137.198207b.0415>
4. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions / Nan Ce-Wen [et al.] // J. Appl. Phys. – 2008. – Vol. 103, iss. 3. – P. 031101-1. <https://doi.org/10.1063/1.2836410>

В свою очередь, на основании РЭМ анализа (см. рис. 2) элементного состава по глубине был сделан вывод об отсутствии промежуточных фаз между слоями TiO₂ и Co (количество атомов кобальта в слое TiO₂, а также атомов титана и кислорода в слое кобальта оказалось недостаточным для идентификации). Известно [18], что нестехиометрическая фаза диоксида титана TiO_{2-x} способна окисляться до TiO₂ в наноразмерном состоянии, отбирая кислород у кобальта и препятствуя тем самым образованию оксида кобальта. Последний является антиферромагнетиком, который существенно ухудшает ФМ свойства слоя кобальта и, как следствие, приводит к уменьшению МЭ взаимодействия ФМ и СЭ компонентов.

На рис. 4 представлена полевая зависимость МЭ коэффициента по напряжению α для структуры Co/ЦТС, полученной в результате планаризации поверхности ЦТС посредством напыления в течение 45 мин планаризирующего слоя, идентичного по составу подложки, и его распыления ионами кислорода в течение 180 мин

5. Giant Magneto-Electric Effect in Laminate Composites / S. X. Dong [et al.] // *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*. – 2003. – Vol. 50. – P. 1236–1239. <https://doi.org/10.1080/09500830310001621605>
6. Novel magnetoelectric bilayer and multilayer structures of magnetostrictive and piezoelectric oxides / G. Srinivasan [et al.] // *Phys. Rev. B: Condens. Matter*. – 2001. – Vol. 64. – 214408-1-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.214408>
7. Перов, Н. С. Резонансное магнитоэлектрическое взаимодействие в несимметричной биморфной структуре ферромагнетик-сегнетоэлектрик. / Н. С. Перов, Л. Ю. Фетисов, Ю. К. Фетисов // *Письма в Журн. техн. физики*. – 2011. – Т. 37, вып. 6. – С. 1–7.
8. Srinivasan, G. Influence of bias electrical field on magnetoelectric interactions in ferromagnetic-piezoelectric layered structures / G. Srinivasan, Y. K. Fetisov, L. Y. Fetisov // *Appl. Phys. Lett.* – 2009. – Vol. 94. – P.132507-3. <https://doi.org/10.1063/1.3114406>.
9. Формирование плоскопараллельной межфазной границы в гетероструктуре Ni/PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃ / А. И. Стогний [и др.] // *Неорган. материалы*. – 2012. – Т. 48, №8. – С. 947–951.
10. Магнитоэлектрический эффект в планарных структурах аморфный ферромагнетик FeNiSiC – пьезоэлектрик / Л. Ю. Фетисов [и др.] // *Журн. техн. физики*. – 2011. – Т. 81, №4. – С. 56–61.
11. Preparation and investigation of the magnetoelectric properties in layered cermet structures / A. I. Stognij [et al.] // *Ceramics International*. – 2019. – Vol. 45, №10. – P. 13030–13036. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.234>
12. Магнитоэлектрический эффект в структурах на основе металлизированных подложек арсенида галлия / В. М. Лалетин [и др.] // *Письма в Журн. техн. физики*. – 2014. – Т. 40, №21. – С. 71–78.
13. Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin Films / N. Izyumskaya [et al.] // *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.* – 2007. – Vol. 32, №3. – P. 111–202. <https://doi.org/10.1080/10408430701707347>
14. Magnetoelectric effects in porous ferromagnetic-piezoelectric bulk composites: Experiment and theory / V. M. Petrov [et al.] // *Phys. Rev. B*. – 2007. – Vol. 75. – P. 174422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.174422>
15. Dependence of magnetoelectric effect in layered lead zirconate-titanate/nickel heterostructures on the interface type / N. N. Poddubnaya [et al.] // *Funct. Mater.* – 2010. – Vol. 17, №3. – P. 329–334.
16. Ziegler, J. F. The Stopping and Range of Ions in Solids / J. F. Ziegler, J. P. Biersack, U. Littmark. – New York: Pergamon Press, 1985. – 485 p.
17. О визуализации области магнитоэлектрического взаимодействия тонкого слоя ферромагнетика на сегнетоэлектрической подложке / А. И. Стогний [и др.] // *Неорган. материалы*. – 2019. – Т. 55, №3. – С. 311–316.
18. Ионно-лучевая инженерия многослойной наноструктуры Co/TiO₂ / А. И. Стогний [и др.] // *Письма в Журн. техн. физики*. – 2010. – Т. 36, вып. 9. – С. 73–81.

References

1. Pyatakov A. P., Zvezdin A. K. Magnetoelectric and multiferroic media. *Physics-Uspekhi*, 2012, vol. 55, no. 6, pp. 557–581. <https://doi.org/10.3367/UFNe.0182.201206b.0593>
2. Belous A. G., V'yunov O. I. Multiferroics: synthesis, structure and properties. *Ukrainskii khimicheskii zhurnal = Ukrainian Chemistry Journal*, 2012, vol. 78, no. 7, pp. 41–70 (in Russian).
3. Smolenskii G. A., Chupis I. E. Ferroelectromagnets. *Physics-Uspekhi*, 1982, vol. 25, no. 7, pp. 475–493. <https://doi.org/10.1070/PU1982v025n07ABEH004570>
4. Nan Ce-Wen, Bichurin M. I., Dong Shuxiang, Viehland D., Srinivasan G. Multiferroic magnetoelectric composites: Historical perspective, status, and future directions. *Journal of Applied Physics*, 2008, vol. 103, iss. 3, pp. 031101-1. <https://doi.org/10.1063/1.2836410>
5. Dong S. X., Cheng J. R., Li J. F., Viehland D. Giant Magneto-Electric Effect in Laminate Composites. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, 2003, vol. 50, pp. 1236–1239. <https://doi.org/10.1080/09500830310001621605>
6. Srinivasan G., Rasmussen E. T., Gallegos J., Srinivasan R., Bokhan Y.I., Laletin V. M. Novel magnetoelectric bilayer and multilayer structures of magnetostrictive and piezoelectric oxides. *Physical Review B: Condensed Matter*, 2001, vol. 64, 214408-1-6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.64.214408>
7. Perov N. S. Fetisov L. Yu. Fetisov Yu. K. Resonant magnetoelectric interaction in asymmetric bimorphous ferromagnetic-ferroelectric structure. *Technical Physics Letters*, 2011, vol. 37, art. no. 244. <https://doi.org/10.1134/S1063785011030291>
8. Srinivasan G., Fetisov Y. K., Fetisov L. Y. Influence of bias electrical field on magnetoelectric interactions in ferromagnetic-piezoelectric layered structures. *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 94, pp. 132507-3. <https://doi.org/10.1063/1.3114406>
9. Stognij A. I., Novitskii N. N., Sharko S. A., Bepalov A. V., Golikova O. L., Ketsko V. A., Fabrication of a Plane-Parallel Interface in Ni/PbZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃ Heterostructures. *Inorganic Materials*, 2012, vol. 48, no. 8, pp. 832–835. <https://doi.org/10.1134/s0020168512080146>
10. Fetisov L. Y., Fetisov Y. K., Perov N. S., Chashin D. V. Magnetoelectric effect in amorphous FeNiSiC ferromagnet-piezoelectric planar structures. *Technical Physics*, 2011, vol. 56, iss. 4, pp. 485–490. <https://doi.org/10.1134/s1063784211040153>
11. Stognij A. I., Sharko S. A., Serokurova A. I., Trukhanov S. V., Trukhanov A. V., Panina L. V., Ketsko V. A., Dyakonov V. P., Szymczak H., Vinnik D. A., Gudkova S. A. Preparation and investigation of the magnetoelectric properties in layered cermet structures. *Ceramics International*, 2019, vol. 45, no.10, pp. 13030-13036. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.234>

12. Laletin V. M., Stognii A. I., Novitskii N. N., Poddubnaya N. N. The Magnetoelectric Effect in Structures Based on Metallized Gallium Arsenide Substrates. *Technical Physics Letters*, 2014, vol. 40, no. 11, pp. 969–971. <https://doi.org/10.1134/S1063785014110078>

13. Izyumskaya N., Alivov Y.-I., Cho S.-J., Morkoç H., Lee H., and Kang Y.-S. Processing, Structure, Properties, and Applications of PZT Thin Films. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2007, vol. 32, no. 3, pp. 111–202. <https://doi.org/10.1080/10408430701707347>

14. Petrov V. M., Srinivasan G., Laletin V. M., Bichurin M. I., Tuskov D. S., Poddubnaya N. N. Magnetoelectric effects in porous ferromagnetic-piezoelectric bulk composites: Experiment and theory. *Physical Review B: Condensed Matter*, 2007, vol. 75, pp. 174422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.174422>

15. Poddubnaya N. N., Laletin V. M., Stognij A. I., Novitskii N. N. Dependence of magnetoelectric effect in layered lead zirconate-titanate/nickel heterostructures on the interface type. *Functional Materials*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 329–334.

16. Ziegler J. F., Birsack J. P., Littmark U. *The Stopping and Range of Ions in Solids*. New York, Pergamon Press, 1985. 485 p.

17. Stognij A. I., Novitskii N. N., Sharko S. A., Bepalov A. V., Golikova O. L., Smirnova M. N., Ketsko V. A. On the Visualization of the Magnetoelectric Coupling Region for a Thin Ferromagnetic Layer on a Ferroelectric Substrate. *Inorganic Materials*, 2019, vol. 55, no. 3, pp. 284–289. <https://doi.org/10.1134/s0020168519030142>

18. Stognij A. I., Pashkevich M. V., Novitskii N. N., Bepalov A. V. Ion-beam engineering of Co/TiO₂ multilayer nanostructures. *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, iss. 5, pp. 426–429. <https://doi.org/10.1134/S1063785010050111>

Информация об авторах

Стогний Александр Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: stognij@ifftp.bas-net.by. <http://orcid.org/0000-0002-4703-8095>

Шарко Сергей Александрович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sharko@physics.by. <https://orcid.org/0000-0002-7802-7487>

Серокурова Александра Ивановна – аспирант, младший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: serokurova@ifftp.bas-net.by. <http://orcid.org/0000-0001-9825-2828>

Новицкий Николай Николаевич – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: novitski@ifftp.bas-net.by. <https://orcid.org/0000-0002-6607-4681>

Пoddубная Наталья Никитична – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси (пр. Генерала Лядникова, 13, 210023, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: poddubnaya.n@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9809-487>

Кецко Валерий Александрович – доктор химических наук, главный научный сотрудник, Институт общей и неорганической химии имени Н. С. Курнакова Российской академии наук (Ленинский пр., 31, 119991, Москва, Российская Федерация). E-mail: ketsko@igic.ras.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2075-1755>

Information about the authors

Aleksandr I. Stognij – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072 Minsk, Republic of Belarus). E-mail: stognij@ifftp.bas-net.by. <http://orcid.org/0000-0002-4703-8095>

Sergei A. Sharko – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072 Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sharko@physics.by. <https://orcid.org/0000-0002-7802-7487>

Aleksandra I. Serokurova – Postgraduate Student, Junior Researcher, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072 Minsk, Republic of Belarus). E-mail: serokurova@ifftp.bas-net.by. <http://orcid.org/0000-0001-9825-2828>

Nikolay N. Novitskii – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072 Minsk, Republic of Belarus). E-mail: novitski@ifftp.bas-net.by. <https://orcid.org/0000-0002-6607-4681>

Natalya N. Poddubnaya – Ph. D. (Physics and Mathematics), Senior Researcher, Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Science of Belarus (13, General Liudnikov Ave., 210023 Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: poddubnaya.n@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0002-9809-487>

Valerii A. Ketsko – D. Sc. (Chemistry), Chief Researcher, Kurnakov Institute of General and Inorganic Chemistry of the Russian Academy of Sciences (31, Leninskii Ave., 119991, Moscow, Russian Federation). E-mail: ketsko@igic.ras.ru. <https://orcid.org/0000-0002-2075-1755>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 539.4;621.039.531

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-153-161>

Поступила в редакцию 14.11.2019

Received 14.11.2019

А. В. Богданович*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь***ОЦЕНКА РЕСУРСА ТРУБ ГЛАВНОГО ЦИРКУЛЯЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА
АЭС ПО КРИТЕРИЮ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ
ДЕГРАДАЦИИ СВОЙСТВ**

Аннотация. Приводятся результаты экспериментального определения характеристик циклической трещиностойкости образцов из нержавеющей пластичной стали 08X18H12T. Компактные образцы толщиной 20 мм, вырезанные из труб Ду 550×30 первого контура главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ), исследовались при внецентренном растяжении в исходном состоянии и после 100 тыс. ч эксплуатации в условиях Ново-Воронежской АЭС. С использованием нового инженерного подхода, основанного на измерении утяжки образца и построении диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной в координатах «утяжка – коэффициент интенсивности напряжений, вычисленный с учетом поправки на пластичность», дана расчетная оценка ресурса труб Ду 550×30 ГЦТ АЭС из стали 08X18H12T по критерию циклической трещиностойкости с учетом эксплуатационной деградации свойств, вызванной наработкой 100 тыс. ч. Определен ресурс (живучесть), выраженный в количестве циклов изменения внутреннего давления, для трубы с наиболее опасными дефектами (поверхностная полуэллиптическая трещина и комбинированный дефект «питтинг + трещина»). Выполнен анализ влияния уровня начальной поврежденности и вида опасного дефекта на живучесть труб. Полученные результаты могут использоваться для анализа поврежденности и прогнозирования ресурса труб из пластичных металлов и сплавов в системах охлаждения реакторов, а также магистральных трубопроводов транспорта углеводородов.

Ключевые слова: трубопровод, трещиностойкость, ресурс, длительная эксплуатация, коэффициент интенсивности напряжений, утяжка, скорость роста трещины

Для цитирования: Богданович, А. В. Оценка ресурса труб главного циркуляционного трубопровода АЭС по критерию трещиностойкости с учетом эксплуатационной деградации свойств / А. В. Богданович // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 153–161. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-153-161>

Alexander V. Bogdanovich*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus***ESTIMATION OF THE RESOURCE OF PIPES OF THE MAIN CIRCULATION PIPELINE OF A NPP
BY THE CRITERION OF CRACK RESISTANCE WITH ACCOUNT OF OPERATIONAL DEGRADATION
OF PROPERTIES**

Abstract. The results of an experimental determination of the characteristics of cyclic crack growth resistance of specimens made of stainless steel 08Kh18N12T are given. Compact samples 20 mm thick cut from Du 550–30 pipes of the primary circuit of the main circulation pipeline (MCP) were studied under eccentric tension in the initial state and after 100 thousand hours of operation in the conditions of the Novo-Voronezh NPP. Using a new engineering approach based on measuring the specimen tightening and constructing a cyclic elastoplastic fracture diagram for a specimen with a crack in the coordinates “tightening – the stress intensity factor, calculated taking into account the plasticity correction”, a calculated life estimation is given for the pipe of Du 550–30 MCP NPP, made of 08Kh18N12T steel, according to the criterion of cyclic crack growth resistance, taking into account operational degradation of properties caused by the running time of 100 thousand hours. The life (survivability), expressed in a number of cycles of change in internal pressure, for a pipe with the most dangerous defects (surface semi-elliptical crack and combined defect “pitting + crack”) is determined. An analysis of the influence of the level of initial damage and the type of hazardous defect on the survivability of the pipes is made. The results can be used to analyze damage and predict the life of pipes made of ductile metals and alloys, in cooling systems of reactors, as well as main pipelines of hydrocarbon transport.

Keywords: pipeline, crack resistance, life, long-term operation, stress intensity factor, tightening, crack growth rate

For citation: Bogdanovich A. V. Estimation of the resource of pipes of the main circulation pipeline of a NPP by the criterion of crack resistance with account of operational degradation of properties. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 153–161 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-153-161>

Введение. Сосуды и трубопроводы занимают центральное место в проблеме безопасности и ресурса эксплуатации энергоблока АЭС, поскольку они являются наиболее многочисленной группой конструкций энергоблока; имеют большие запасы упругой энергии и оказывают наибольшее влияние на ядерную, радиационную и техническую безопасности станции; их замена или ремонт связаны, как правило, с большими материальными затратами [1].

На стадии проектно-конструкторских работ материалы сосудов и трубопроводов выбираются таким образом, чтобы их прочность обеспечивалась на протяжении всего срока эксплуатации, при этом в элементах не допускаются не только зарождение каких-либо трещин, но даже переход сечения стенки сосуда или трубопровода в пластическое состояние. Требование недопустимости разрушения в условиях эксплуатации для оборудования и трубопроводов АЭС содержится в ряде нормативных документов (ОПБ-88/97 «Общие положения по обеспечению безопасности атомных станций», Москва, 1998; [2]; Код ASME. US Nuclear Regulatory, USA; Код RSEM. EDF. Electricité de France и др.). В этих нормативных документах приведены также технические средства, обеспечивающие указанную норму. Однако во многих странах мира независимо от типа и конструктивных особенностей, условий эксплуатации на АЭС ежегодно обнаруживают повреждения конструктивных элементов, в том числе и трещины. Наиболее опасные из этих трещин провоцируют образование течей или даже полное разрушение конструктивного элемента, что может привести к человеческим жертвам (например, на АЭС «Михама» в Японии в 2004 г.).

Типичными эксплуатационными непроектными процессами повреждения для оборудования АЭС (в том числе трубопроводов охлаждения, теплообменных труб, пластин и корпусов парогенераторов) являются: коррозионное растрескивание под напряжением; межкристаллитная коррозия; коррозионно-механическая усталость и износ; фреттинг-коррозия; радиационное охрупчивание; развитие скрытых дефектов сплошности металла [1]. Эти процессы обуславливают деградацию механических свойств металлических материалов, из которых изготовлены конструктивные элементы оборудования и трубопроводов. При этом наиболее опасными являются трещины, которые нередко образуются в местах концентрации напряжений. В качестве примера на рис. 1 представлены фото дефектной зоны теплообменных труб 60-96 и 60-102 (сталь 08X18H10T) парогенератора №3 Балтийской АЭС. В ходе технической экспертизы было установлено, что причиной коррозионной язвы, на дне которой зародилась усталостная трещина, яви-

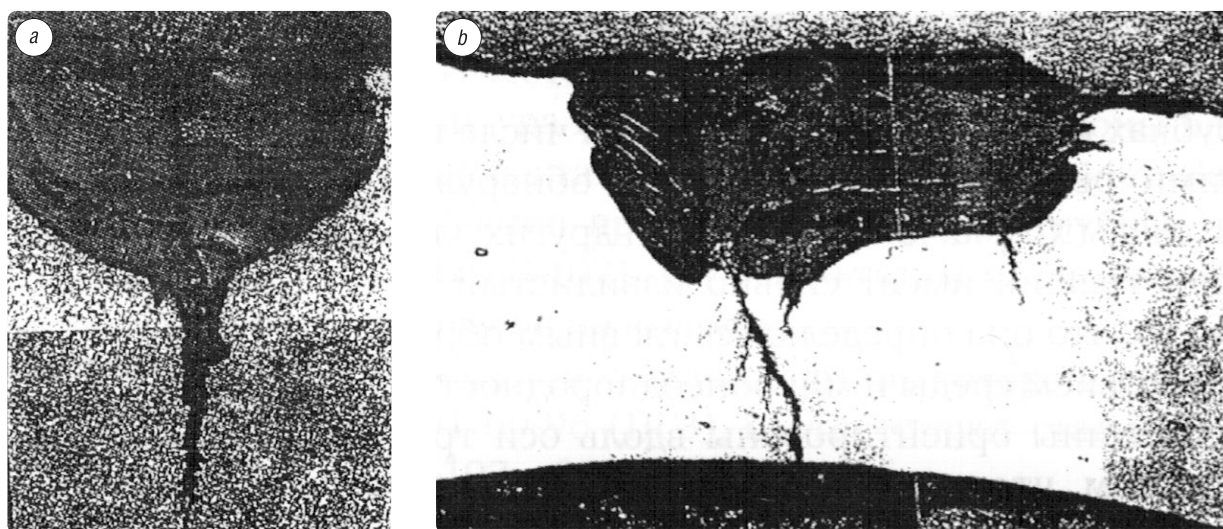


Рис. 1. Микроструктура дефектной зоны с коррозионной язвой и трещиной на участках теплообменных труб 60-96 (внутренняя сторона трубы) между дистанционирующими решетками 2 и 3 (а) и 60-102 (наружная сторона трубы) под дистанционирующей решеткой 3 (б) парогенератора №3 Балтийской АЭС [1]

Fig. 1. The microstructure of the defective zone with a corrosive ulcer and a crack in the sections of the heat-exchange pipes 60-96 (inner side of the pipe) between the spacer grids 2 and 3 (a) and 60-102 (the outer side of the pipe) under the spacer grid 3 (b) of steam generator No. 3 Baltic NPP [1]

лось попадание продуктов коррозии из конденсатно-питательного тракта и их накопление в виде отложений и шлама [1].

Цель настоящей работы – оценка ресурса труб АЭС по критерию циклической трещиностойкости на примере труб главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) с учетом эксплуатационной деградации свойств.

Влияние эксплуатационных факторов на характеристики трещиностойкости материала труб ГЦТ АЭС. Для изучения влияния эксплуатационной наработки на характеристики циклической трещиностойкости при изготовлении компактных образцов применяли вырезки труб Ду 550×30 из нержавеющей стали 08X18H12T первого контура ГЦТ Ново-Воронежской АЭС (реакторная установка ВВЭР-440) в исходном состоянии и после 100 тыс. ч эксплуатации. Ограниченное количество металла после эксплуатации, полученного с АЭС, позволило изготовить образцы с направлением фронта развития трещины (ФРТ) только в окружном и осевом направлениях.

Учитывая, что испытанию подвергали пластичную сталь, проводили оценку применимости основных формул линейной механики разрушения. Соблюдение условий плоской деформации проверяли по критериям (ГОСТ 25.506-85 «Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении»; МР 1-95 «Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении / Механика катастроф. Определение характеристик трещиностойкости конструкционных материалов. Методические рекомендации», с. 7–82):

$$K_I \leq K_I^* = \sqrt{t_0 \sigma_{0,2}^2 / 2,5}; \quad (1)$$

$$\psi = \frac{t_0 - t_\phi}{t_0} \cdot 100 \% \leq 1,5 \%, \quad (2)$$

где K_I – коэффициент интенсивности напряжений (КИН), МПа $\sqrt{м}$; t_0 – номинальная толщина компактного образца, м; t_ϕ – толщина компактного образца с учетом упругопластической деформации, м; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести материала, МПа; ψ – относительная утяжка поперечного сечения образца (рис. 2, а).

Оказалось, что для исследуемой пластичной стали в верхней части кинетической диаграммы усталостного разрушения условия (1), (2) не выполняются, поэтому был применен подход [3], согласно которому для вычисления КИН используются формулы линейной механики разрушения, но с поправкой на пластичность. Например, для компактного образца (см. рис. 2, а)

$$K_{I \max}^F = \frac{P_{\max}}{t_0 \sqrt{B}} \omega_F^{1/2} Y(\omega_F), \quad (3)$$

$$Y(\omega_F) = 29,6 - 185,5(\omega_F) + 655,7(\omega_F)^2 - 1017(\omega_F)^3 + 638,9(\omega_F)^4, \quad (4)$$

где P_{\max} – максимальная нагрузка цикла, Н; t_0 , B – размеры опасного сечения образца, м (см. рис. 2, а); $Y(\omega_F)$ – поправочная функция, которая учитывает геометрию образца и схему его нагружения, а также интегрально величину пластической деформации в опасном сечении; $\omega_F = F_l/F_0$ – локальная мера поврежденности; F_0 – номинальная (до деформации) площадь опасного сечения образца, м²; F_l – площадь, м², поврежденная трещиной длиной l , м, и определенная с учетом пластической деформации сечения.

В соответствии с подходом [3] при испытаниях компактных образцов определяют поперечную составляющую пластической деформации образца в зоне развития трещины (утяжку ϕ) как разность номинального t_0 и текущего t_ϕ значений толщины образца, то есть $\phi = t_0 - t_\phi$ (см. рис. 2, а), ее относительная величина (относительная утяжка) $\psi = \phi/t_0$. При этом весь процесс упругопластического деформирования и разрушения описывается с помощью диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы ЦУПРОТ), которую строят в координатах КИН K_I^F – относительная ψ - или абсолютная ϕ -утяжка (как показано на рис. 2, б).

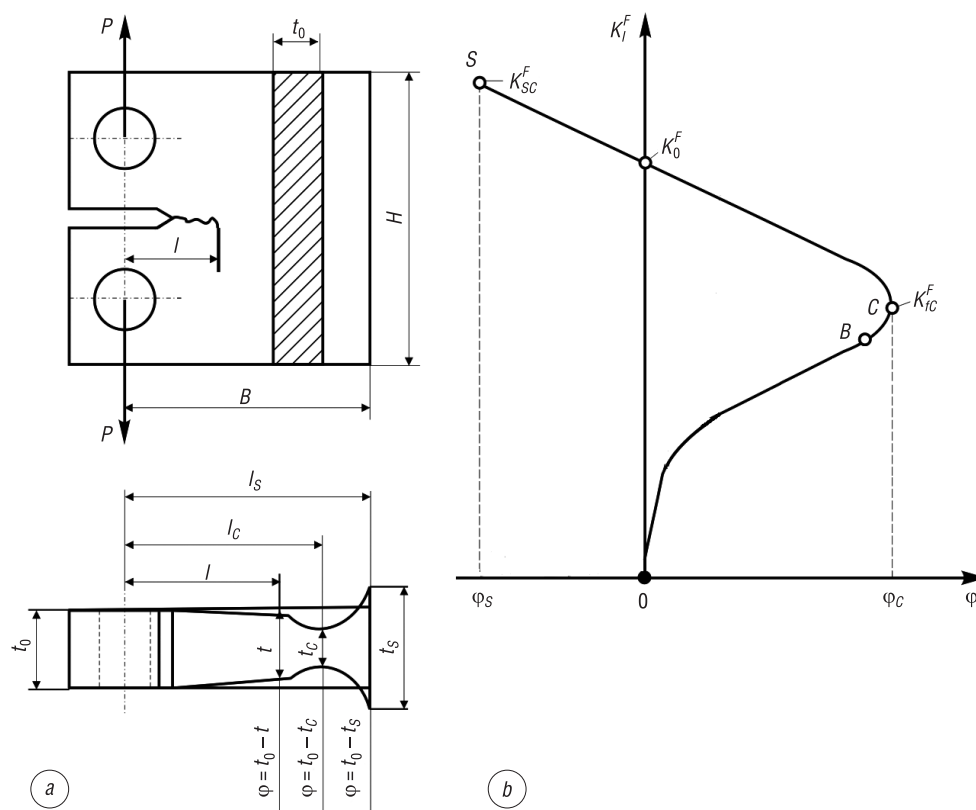


Рис. 2. Схемы нагружения компактного образца и измерения утяжки (а) и диаграммы циклического упругопластического разрушения образца с трещиной (диаграммы ЦУПРОТ, б)

Fig. 2. Schemes: a – loading of a compact specimen and measurement of tightening; b – cyclic elastoplastic fracture diagram for a specimen with a crack (CEPF-diagram)

Испытания на циклическую трещиностойкость компактных образцов, вырезанных из труб Ду 550×30 ГЦТ, толщиной 20 мм при внецентренном растяжении проводили с частотой 20 Гц, асимметрией цикла 0,1, при комнатной температуре на испытательной машине ЦДМ-10Пу в соответствии с требованиями МР 1-95.

Результаты испытаний приведены в виде кинетической диаграммы усталостного разрушения на рис. 3 (для образцов с ФРТ в осевом направлении), а численные значения характеристик трещиностойкости даны в таблице. Коэффициент влияния эксплуатации $A_{\text{экспл}}$ определяли как отношение значения параметра материала после эксплуатации к значению данного параметра для материала в исходном состоянии.

Анализируя полученные результаты, отметим, что при развитии трещин как в окружном, так и в осевом направлениях можно выделить на диаграмме усталостного разрушения три участка, два из которых являются чувствительными к эксплуатационной наработке, а один – не реагирует на эксплуатационное воздействие. Так, в области малых скоростей роста трещины (менее $2 \cdot 10^{-8}$ м/цикл) металл, бывший в эксплуатации, имеет скорость роста трещины выше, чем металл в состоянии поставки. При этом для образцов с ФРТ в окружном направлении это превышение имеет большее абсолютное значение, чем для образцов с ФРТ в осевом направлении (таблица). В диапазоне скоростей роста трещины от $\sim 2 \cdot 10^{-8}$ м/цикл до $2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл (при значениях КИН от ~ 18 до 50–55 МПа $\sqrt{\text{м}}$) происходит слияние областей рассеяния диаграмм усталостного разрушения испытанных образцов как в состоянии поставки, так и после эксплуатации. Третий участок диаграмм при скорости роста трещины более $2 \cdot 10^{-6}$ м/цикл также наглядно демонстрирует превышение скорости роста трещины в материале после эксплуатации по сравнению со скоростью роста трещины в исходном материале.

Автором установлено, что наибольшее значение предельная скорость роста трещин имеет в образцах с ФРТ в осевом направлении, изготовленных из материала, бывшего в эксплуатации;

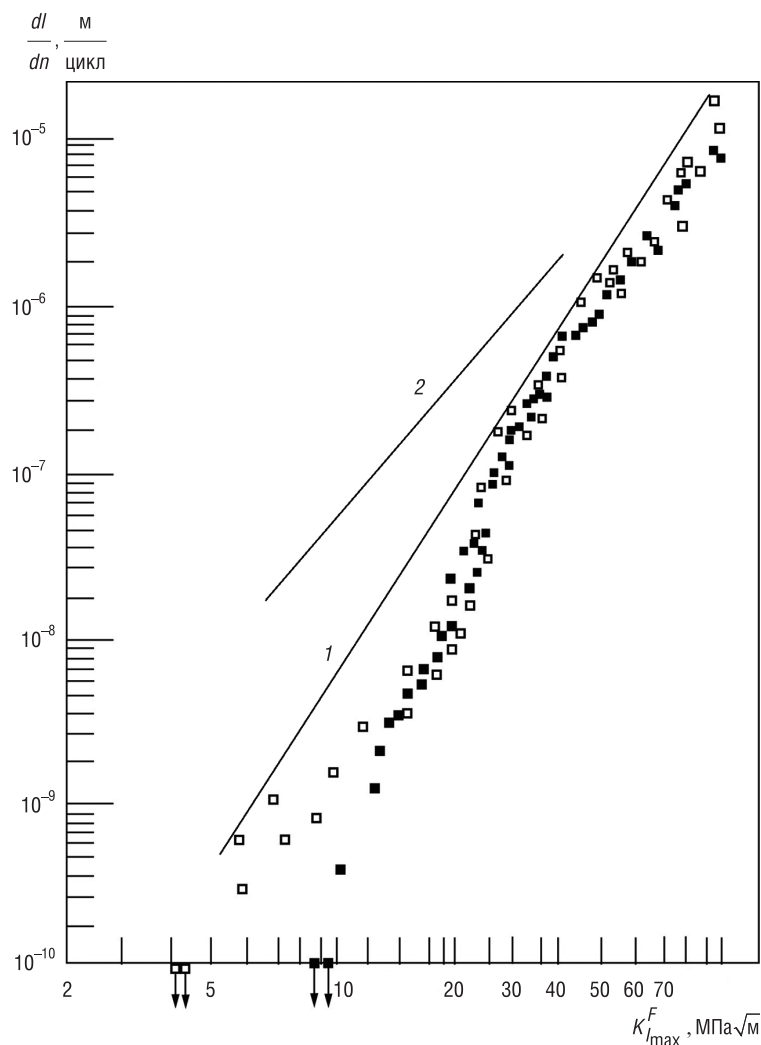


Рис. 3. Экспериментальная кинетическая диаграмма усталостного разрушения стали 08X18N12T в зависимости от эксплуатационной нагрузки с фронтом развития трещины в осевом направлении: ■ – исходное состояние; □ – после 100 тыс. ч эксплуатации; 1 – верхняя огибающая экспериментальных результатов; 2 – нормативная кривая [4]

Fig. 3. Experimental kinetic diagram of fatigue fracture for 08Kh18N12T steel depending on the operating time with front of crack development in the axial direction: ■ – initial state; □ – after 100 thousand hours of operation; 1 – upper envelope of the experimental results; 2 – normative curve [4]

предельное значение скорости роста трещины в образцах с ФРТ в окружном направлении возросло на 41,9 %, а в образцах с ФРТ в осевом направлении – на 46,5 %.

Большое влияние оказали эксплуатационные воздействия на значения КИН в пороговой и припороговой областях. Так, пороговые значения КИН в образцах с ФРТ в окружном направлении снизились на 64,2 %, а с ФРТ в осевом направлении – на 52,6 % (см. таблицу). С возрастанием численных значений КИН влияние эксплуатационных факторов уменьшается, предельные значения КИН K_{fc}^F снижаются лишь на 6,3 % для образцов с ФРТ в окружном направлении и на 1,9 % для образцов с ФРТ в осевом направлении.

Влияние эксплуатационных факторов сказывается и на пластических свойствах исследованной стали. Изменение величины утяжки под действием эксплуатационных факторов (см. таблицу) показывает, что влияние длительной эксплуатации ведет к уменьшению утяжки, то есть способствует охрупчиванию металла.

На рис. 3 для сравнения изображена также нормативная кривая – диаграмма усталостного разрушения, определенная документом М-02-91 «Методика определения допустимых размеров

Влияние эксплуатационной наработки на характеристики трещиностойкости стали 08X18N12T [4]
Influence of operating time on the crack resistance characteristics of 08Kh18N12T steel [4]

Параметр	Направление ФРТ	Состояние материала		Коэффициент влияния эксплуатации $A_{\text{экспл}}$
		исходное	после 100 тыс. ч эксплуатации	
Пороговый КИН $K_{I_{th}}^F$, МПа $\sqrt{\text{м}}$	Окружное	8,04	2,88	0,36
	Осевое	8,92	4,23	0,47
Предельный КИН (циклическая вязкость разрушения) K_{fc}^F , МПа $\sqrt{\text{м}}$	Окружное	106,0	100,2	0,94
	Осевое	99,2	97,3	0,98
Скорость роста трещины v , м/цикл при $K_{I_{\text{max}}}^F \approx 10$ МПа $\sqrt{\text{м}}$	Окружное	$6,8 \cdot 10^{-10}$	$5 \cdot 10^{-9}$	7,35
	Осевое	$4,2 \cdot 10^{-10}$	$2,6 \cdot 10^{-9}$	6,19
Скорость роста трещины v , м/цикл при $K_{I_{\text{max}}}^F \approx 35$ МПа $\sqrt{\text{м}}$	Окружное	$3,4 \cdot 10^{-7}$	$2,8 \cdot 10^{-7}$	0,82
	Осевое	$3 \cdot 10^{-7}$	$2,6 \cdot 10^{-7}$	0,87
Предельная скорость роста трещины v_c , м/цикл	Окружное	$3,6 \cdot 10^{-6}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	1,72
	Осевое	$6,95 \cdot 10^{-6}$	$1,3 \cdot 10^{-5}$	1,72
Предельная утяжка образца φ_c , мм	Окружное	2,81	2,44	0,87
	Осевое	2,26	1,82	0,81
Предельное уширение образца φ_s , мм	Окружное	-2,20	-1,61	0,73
	Осевое	-1,77	-1,51	0,85

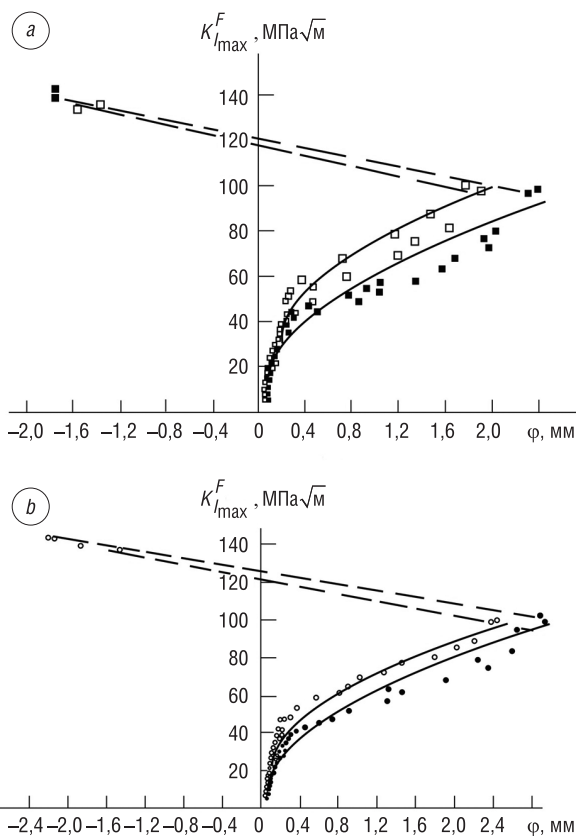


Рис. 4. Диаграмма $K_{I_{\text{max}}}^F - \varphi$ стали 08X18N12T в зависимости от эксплуатационной наработки для образцов с ФРТ в направлении: ● – окружном, ■ – осевом в исходном состоянии (а) и ○ – окружном, □ – осевом после эксплуатационной наработки (б) [4]

Fig. 4. The diagram $K_{I_{\text{max}}}^F - \varphi$ of 08Kh18N12T steel depending on the operating time for specimens with front of crack development in the direction: ● – circumferential, ■ – axial in the initial state (a) and ○ – circumferential, □ – axial after operational time (b) [4]

несплошности металла оборудования и трубопроводов во время эксплуатации АЭС». Видно, что полученные экспериментальные результаты лежат ниже нормативной кривой, что свидетельствует о том, что длительная эксплуатация в условиях АЭС не привела к опасному нарушению несущей способности материала труб по критерию циклической трещиностойкости.

Диаграмму ЦУПРОТ для стали 08X18N12T строили по результатам проведенных испытаний на циклическую трещиностойкость компактных образцов и измерения утяжки образцов в зоне развития усталостной трещины, откладывая по оси абсцисс утяжку образца, а по оси ординат – величину КИН $K_{I_{\text{max}}}^F$, соответствующую ей и вычисленную по формуле (3) с учетом предложенной поправки на пластичность. Эта диаграмма, приведенная на рис. 4, подтверждает процесс охрупчивания стали 08X18N12T под действием эксплуатационных факторов, причем снижение предельной величины утяжки в образцах с ФРТ в окружном направлении составляет 12,8 %, а в образцах с ФРТ в осевом направлении – 19,5 % (см. таблицу).

Определение ресурса труб ГЦТ АЭС при наличии трещинообразных дефектов. Для оценки ресурса труб при регулярном нагружении по критерию трещиностойкости (живучести) с учетом влияния эксплуатационных процессов деградации свойств материала будем использовать формулу

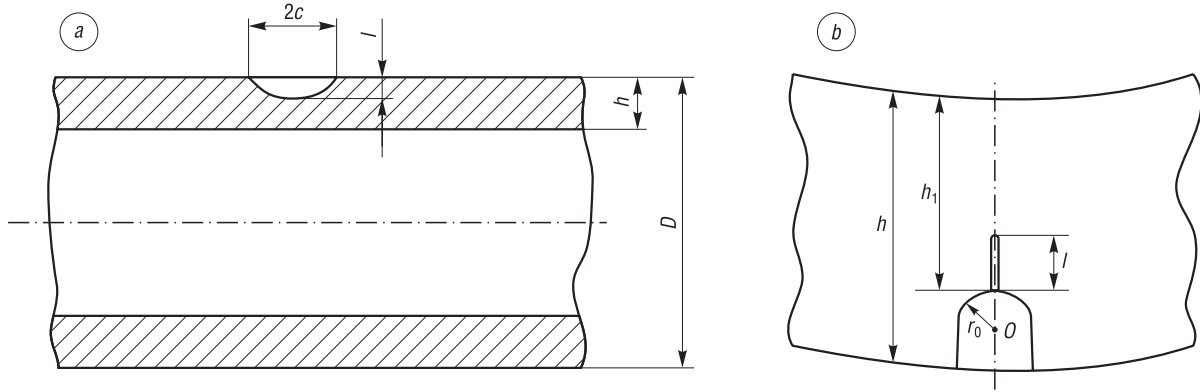


Рис. 5. Схемы: развития поверхностной усталостной трещины в трубе (а); фрагмента трубы с комбинированным дефектом «питтинг + трещина» (b)

Fig. 5. Schemes: development of a surface fatigue crack in a pipe (a); pipe fragment with a combined defect “pitting + crack” (b)

$$N_{ж} = \frac{(1 - \omega_F)^{m_k(t)+1}}{C_k(t)[m_k(t) + 1] (K_{I_{max}} - K_{th}(t))^{m_k(t)}}, \quad (5)$$

где C_k и m_k – параметры (постоянные материала), определяемые по кинетической диаграмме усталостного разрушения в координатах скорость роста трещины $v = d(1 - \omega_F)/dn$ – максимальный КИН $K_{I_{max}}$ (или его размах ΔK_I), то есть по смыслу и по размерности параметры C_k и m_k соответственно тождественны известным параметрам C_k и m_k уравнения Пэриса; N_6 – длительность в циклах одного блока нагружения; K_{th} – пороговый КИН; параметр t в скобках обозначает, что данная характеристика определена с учетом фактического времени эксплуатации нефтепровода и соответствующего влияния эксплуатационных процессов деградации.

Различают поверхностные и подповерхностные трещинообразные дефекты труб, но поскольку подповерхностные дефекты опасного размера выявляют еще на этапе тщательного входного контроля, среди эксплуатационных дефектов преобладают поверхностные, которые, согласно нормам [2], принято схематизировать в виде полуэллиптических трещин глубиной l , полудлиной c при соотношении $l/c = 2/3$ (рис. 5, а). Такие трещины, ориентированные вдоль оси трубопровода, являются наиболее опасными.

Преобразовав формулу для КИН в трубе с трещиной (см. рис. 5, а), рекомендуемую в нормативном документе РД 39-00 147 105-001-91 «Руководящий документ. Методика оценки статической прочности и циклической долговечности магистральных нефтепроводов», путем замены меры поврежденности $\omega_l = l/h$ на меру ω_F имеем

$$K_{I_{max}}^F = \frac{p_{max}(D - 2h)}{2\sqrt{h}} \omega_F^{1/4} Y(\omega_F), \quad (6)$$

где p_{max} – максимальное значение внутреннего давления в трубе, МПа; D – наружный диаметр, м; h – толщина стенки трубы, м; $Y(\omega_F)$ – поправочный коэффициент:

$$Y(\omega_F) = 1,99 - 0,41\omega_F^{1/2} + 18,7\omega_F - 38,48\omega_F^{3/2} + 53,85\omega_F^2. \quad (7)$$

Меру поврежденности ω_F можно найти следующим образом [3]:

$$\omega_F = \left(\frac{l}{h}\right)^2. \quad (8)$$

Как уже было указано, нередко коррозионные язвы (питтинги) становятся очагами усталостных трещин, в результате чего образуется опасный комбинированный дефект «питтинг + трещина». Будем моделировать зону, занятую поврежденным коррозией материалом, U-образным вырезом радиусом r_0 , из центра которого растет усталостная трещина глубиной l (рис. 5, б). Формула для КИН такого дефекта определяется с учетом меры поврежденности ω_F , вычисляемой по выражению (8)

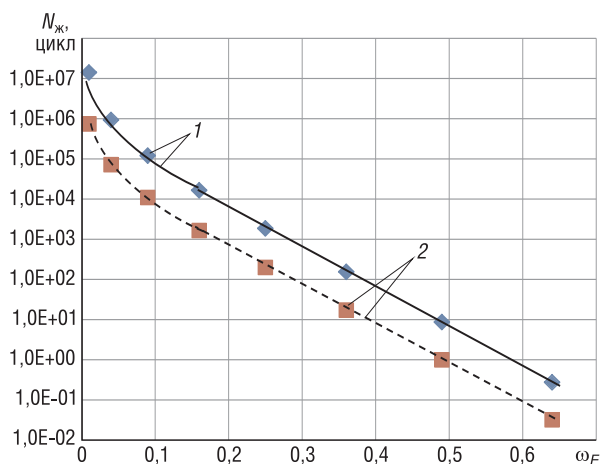


Рис. 6. Расчетные зависимости ресурса (живучести) трубы Ду 550×30 ГЦТ АЭС из стали 08X18N12T в состоянии после 100 тыс. ч эксплуатации от уровня повреждения при наличии поверхностной усталостной трещины (1) и комбинированного дефекта «питтинг + трещина» (2)

Fig. 6. The calculated dependences of the resource (survivability) of a Du 550×30 pipe of NPP main circulation pipeline made of 08Kh18N12T steel in a state after 100 thousand hours of operation on the level of damage in the presence of a surface fatigue crack (1) and a combined “pitting + crack” defect (2)

рабочего внутреннего давления составляют всего 45,1 МПа при пределе текучести материала ~300 МПа [1], видно, что при наличии трещинообразных дефектов, даже если уровень повреждения составляет всего 0,1, живучесть трубы до образования течи составит ~10...100 тыс. циклов перемены рабочего давления (в зависимости от типа дефекта). Комбинированный дефект существенно более опасен, чем обычная полуэллиптическая трещина, – на промежутке изменения ω_F от 0,1 до 0,6 разница в живучести трубы с рассматриваемыми дефектами составляет почти 10 раз.

Заключение. Выполнена расчетная оценка ресурса (живучести) трубы Ду 550×30 ГЦТ АЭС из стали 08X18N12T при регулярном циклическом нагружении внутренним давлением при наличии поверхностной полуэллиптической трещины и комбинированного дефекта «питтинг + трещина». При этом использовались экспериментальные значения характеристик циклической трещиностойкости исследуемой стали после 100 тыс. ч эксплуатации. Установлено, что при рабочем внутреннем давлении $p_{\max} = 12,26$ МПа и наличии трещинообразных дефектов, даже если уровень повреждения составляет всего 0,1, живучесть трубы до образования течи составит ~10...100 тыс. циклов перемены рабочего давления (в зависимости от типа дефекта). Комбинированный дефект существенно более опасен, чем обычная полуэллиптическая трещина: на промежутке изменения ω_F от 0,1 до 0,6 разница в живучести трубы с рассматриваемыми дефектами составляет почти 10 раз.

Полученные результаты могут использоваться для анализа повреждения и прогнозирования ресурса труб из пластичных металлов и сплавов в системах охлаждения реакторов, а также магистральных трубопроводов транспорта углеводородов.

Список использованных источников

1. Аркадов, Г. В. Надежность оборудования и трубопроводов АЭС и оптимизация их жизненного цикла (вероятностные методы) / Г. В. Аркадов, А. Ф. Гетман, А. Н. Родионов. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – 424 с.
2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. – М.: Металлургия, 1989. – 525 с.

$$K_{I_{\max}}^F = \frac{p_{\max}(D-2h)}{2\sqrt{h}} \sqrt{\pi} \omega_F^{1/4} Y(\omega_F). \quad (9)$$

Расчет ресурса по формуле (5) выполнен для трубы с поверхностной полуэллиптической трещиной и для трубы с комбинированным дефектом «питтинг + трещина». Геометрические размеры рассматриваемой трубы Ду 550×30 таковы: $D = 550$ мм, $h = 30$ мм. Нагруженность ее характеризуется рабочим внутренним давлением $p_{\max} = 12,26$ МПа [1]. Параметры C_k и m_k были определены по верхней огибающей 1 экспериментальных результатов кинетической диаграммы усталостного разрушения (см. рис. 3), их значения равны: $C_k = 9 \cdot 10^{-12}$, $m_k = 3,705$. Пороговое значение КИН в осевом направлении после 100 тыс. ч эксплуатации составило $4,23 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ (см. таблицу).

На рис. 6 представлены результаты расчета ресурса, выраженные числом циклов до наступления предельного состояния, в зависимости от уровня повреждения трубы поверхностной полуэллиптической трещиной (кривая 1) и комбинированным дефектом «питтинг + трещина» (кривая 2). Несмотря на то, что напряжения в трубе в осевом направлении от

3. Сосновский, Л. А. Живучесть линейной части нефтепровода / Л. А. Сосновский, А. В. Богданович, А. М. Боровский. – Гомель: НПО «ТРИБОФАТИКА», 2004. – 112 с.

4. Комплексное экспериментальное исследование свойств стали 08Х18Н12Т в связи с длительной эксплуатацией ГЦТ АЭС / Л. А. Сосновский [и др.] // Вест. Акад. наук БССР. Сер. физ.-тэхн. навук. – 1991. – № 1. – С. 42–52.

References

1. Arkadov G. V., Getman A. F., Rodionov A. N. *Reliability of NPP Equipment and Pipelines and Optimization of their Life Cycle (Probabilistic Methods)*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1987. 424 p. (in Russian).

2. *Standards for Calculating the Strength of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants*. Moscow, Metallurgia Publ., 1989. 525 p. (in Russian).

3. Sosnovskii L. A., Bogdanovich A. V., Bordoovskii A. M. *The Survivability of the Linear Part of the Pipeline*. Gomel, S&P Group “Tribo-Fatigue”, 2004. 112 p. (in Russian).

4. Sosnovskii L. A., Hamaza L. A., Getman A. F., Babich N. K., Bogdanovich A. V. A comprehensive experimental study of the properties of 08Kh18N12T steel in connection with the long-term operation of the MCP of NPP. *Vesti Akademii nauk BSSR. Seriya fizika-technichnykh nauk* [Proceedings of the Academy of Sciences of BSSR. Physical-technical series], 1991, no. 1, pp. 42–52 (in Russian).

Информация об авторе

Богданович Александр Вальдемарович – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры теоретической и прикладной механики, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4–406, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bogal@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-9074-0878>

Information about the author

Alexander V. Bogdanovich – D. Sc. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Theoretical and Applied Mechanics, Belarusian State University (4, room 406, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bogal@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-9074-0878>

А. А. Тимофеев¹, В. В. Тимошенко¹, Е. А. Шутова², В. М. Шаповалов¹

¹Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук
Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

²Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина, Мозырь,
Гомельская область, Республика Беларусь

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ СМЕСЕЙ ВТОРИЧНЫХ ТЕРМОПЛАСТОВ

Аннотация. Исследованы физико-механические и технологические характеристики смешанных отходов термопластичных полимеров, в том числе из состава утилизируемых корпусов электронной и электрической техники на основе АБС-пластика. В композиционную систему вводили целевые модифицирующие добавки, обеспечивающие улучшение совместимости полимерных компонентов смесей и стабильные реологические свойства композиции в процессе переработки. Установлено, что поведение вторичных полимеров в смесях друг с другом обуславливается сочетанием их реологических характеристик и других параметров взаимной совместимости, что оказывает значительное влияние на фазовый состав и взаимную упорядоченность микрофаз. Дисперсные добавки вносят существенный вклад в эти процессы, воздействуя на структурирование сопряженных с ними микрообъемов полимера. Целенаправленное регулирование реологических свойств компонентов композиционной системы обеспечит достижение приемлемых и воспроизводимых физико-механических характеристик и технологических показателей процесса, что создаст предпосылки для производства конкурентоспособных изделий с высоким гарантированным сроком службы без применения дефицитного первичного сырья. Разработаны композиционные материалы, адаптированные к стабильной переработке методами экструзии, литья под давлением и пласт-формования в изделия общетехнического назначения с приемлемыми эксплуатационными характеристиками.

Ключевые слова: вторичные термопласты, рециклинг, смеси термопластичных полимеров, экструзия, пласт-формование, модифицирующие добавки, композиционные материалы

Для цитирования: Физико-механические и технологические характеристики композиционных материалов на основе смесей вторичных термопластов / А. А. Тимофеев [и др.] // Вестн. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 162–169. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-162-169>

Aliona A. Timofeenko¹, Vadim V. Timoshenko¹, Ekaterina A. Shutova², Viktor M. Shapovalov¹

¹V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus

²Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin, Mozyr, Gomel region, Republic of Belarus

PHYSICO-MECHANICAL AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON MIXTURES OF SECONDARY THERMOPLASTICS

Abstract. The physico-mechanical and technological characteristics of mixed waste of thermoplastic polymers, including that from the recyclable electronic and electrical equipment based on ABS plastic, were investigated. Target modifying additives were introduced into the composite system to improve the compatibility of polymer components of mixtures and the stable rheological properties of composition during processing. It is established that the secondary polymers behavior in their mixtures is caused by combination of their rheological characteristics and other parameters of mutual compatibility, that has significant impact on phase composition and microphases mutual order. Dispersed additives make a significant contribution to these processes, affecting the structuring of the associated polymer microvolumes. Target regulation of the rheological properties of components will ensure the achievement of acceptable and reproducible physico-mechanical characteristics and technological parameters of process, which will create prerequisites for the production of competitive products with a high guaranteed service life without use of scarce raw materials. Composite materials have been developed that are adapted to stable processing by extrusion, injection molding, and formation molding into technical products with acceptable performance characteristics.

Keywords: secondary thermoplastics, recycling, mixtures of thermoplastic polymers, extrusion, formation molding, modifying additives, composite materials

For citation: Timofeenko A. A., Timoshenko V. V., Shutova E. A., Shapovalov V. M. Physico-mechanical and technological characteristics of composite materials based on mixtures of secondary thermoplastics. *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. 2, pp. 162–169 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-162-169>

Введение. В настоящее время создание композиционных материалов на основе вторичных полимеров относится к актуальной области ресурсосберегающих технологий. Это связано, с одной стороны, с постоянным накоплением в окружающей среде отходов пластиков, что существенно осложняет экологическую обстановку в регионах. С другой стороны, отказ от рециклинга вторичных полимеров нежелателен по экономическим соображениям, поскольку более предпочтительным является их повторное вовлечение в производственный цикл. Исходя из Государственной программы сбора и переработки вторичного сырья в Республике Беларусь на 2009–2015 годы, в соответствии с экспертными оценками объем полимеров в составе твердых коммунальных отходов составляет порядка 300 тыс. т в год. В то же время в Республике Беларусь только 10–15 % таких отходов подвергается вторичной переработке. В развитых странах мира сбор и переработка пластиков находится на высоком уровне, позволяя существенно экономить первичное сырье и электроэнергию [1, 2]. Такие отходы становятся материалом для изготовления примерно каждого четвертого корпуса нового компьютера или картриджа печатного устройства, а новые решетки радиаторов автомобилей на треть состоят из переработанного пластика. Также известны примеры применения вторичных термопластов (полиолефины, акрилонитрил-бутадиен-стирольный пластик [АБС-пластик], полистирол [ПС], поливинилхлорид [ПВХ], полиэтилентерефталат [ПЭТФ]) в качестве добавок в полимерпесчаные композиты, используемые при производстве канализационных люков, бордюров, элементов ливневой канализации и т. д. [3].

Целевой рециклинг вторичных полимеров осложняется смешанным характером нахождения полимеров в промышленных и бытовых отходах. Это требует дополнительных технологических операций по отдельному сбору и сортировке, что приводит к удорожанию технологического процесса. Механические смеси вторичных полимеров в большинстве случаев представляют собой случайные по составу полимерные отходы с непредсказуемой и зачастую низкой совместимостью полимерных компонентов, а изделия из них часто характеризуются неудовлетворительными и/или нестабильными свойствами [1, 4]. Перспективным подходом к решению данной проблемы является разработка технологических принципов целевого рециклинга полимерных отходов (вторичных термопластов) путем получения на их основе композиционных материалов методами измельчения, агломерирования и гранулирования. Последующее введение в такие композиты модифицирующих добавок позволит сформировать изделия технического назначения, в которых было бы реализовано более эффективное совмещение полимеров в композиционной системе, соответственно, достигнуты улучшенные эксплуатационные свойства [5, 6]. При этом будет решаться экологическая проблема и обеспечиваться увеличение жизненного цикла полимеров, а также более полная реализация их возможностей в производстве изделий для различных отраслей народного хозяйства.

Цель настоящего исследования – изучение физико-механических и технологических характеристик композиционных материалов на основе смесей вторичных термопластичных полимеров в присутствии модифицирующих добавок, обеспечивающих получение изделий технического и бытового назначения с приемлемыми потребительскими свойствами.

Объекты и методы исследования. Для проведения исследований использовали вторичные полимеры: полиэтилен высокой плотности (вт. ПЭВП), полиэтилен низкой плотности (вт. ПЭНП), полипропилен (вт. ПП), АБС-пластик (вт. АБС-пластик), полистирол (вт. ПС), полиуретан (вт. ПУ). Содержание вторичных полимеров в композиционной системе в качестве целевой добавки по отношению к основному полимеру варьировали в пределах 5–20 мас.%. В качестве наполнителей при получении полимерпесчаных материалов использовали песок строительный и формовочный (ОАО «Гомельский литейный завод “Центролит”») с размером частиц 315, 500, 800 мкм (ГОСТ 8736-93) в количестве 50–80 мас.%. В качестве модифицирующих добавок в композиции вводили: стеарат кальция (ТУ 34 767 516-003-2008) в количестве 0,5–3,0 мас.%, антиоксидант – суперконцентрат гранулированный (ТУ 2243-001-79 683 189-2008) в количестве 1,0 мас.%, диоксид кремния (Аэросил А-300, ГОСТ 14922-77) в количестве 0,5–5,0 мас.%, сополимер этилена с винилацетатом (СЭВ, марка 11 104-030) в количестве 5–15 мас.%.

Процесс гранулирования осуществляли на двухшнековом экструдере при температурах переработки 160–220 °С и скорости экструзии 50 об./мин.

Формование образцов для физико-механических испытаний проводили на термопласт-автомате ТП EN 30.

Образцы полимерпесчаных материалов получали путем гомогенизации исходных компонентов на лабораторной установке при температурах 180–230 °С с последующим прессованием полимерного расплава в пресс-форме с приложением нагрузки 16 т/см².

Исследование физико-механических характеристик осуществляли на автоматизированном стенде INSTRON 5567 (Великобритания) по стандартной методике (ГОСТ 11262-80). Определение ударной вязкости по Шарпи проводили с помощью маятникового копра по ГОСТ 4647. Для испытаний использовали образцы в виде стандартных брусков с размерами 70 × 10 × 4 мм.

Показатель текучести расплава (ПТР) определяли на экструзионном пластометре ИИРТ-М по ГОСТ 11 645-73.

Результаты и их обсуждение. Как правило, основной вышедших из употребления и утилизируемых отходов электронной и электрической техники являются АБС-пластики, объем которых постоянно увеличивается. Однако их переработка не всегда эффективна, что во многом определяется жесткостью материала вследствие его структурирования и пониженными технологическими свойствами вторичного материала. В результате предварительно проведенных исследований показано, что формируемый повторно АБС-пластик обычно обладает повышенной хрупкостью. Одним из решений по устранению этого недостатка представляется введение в него других вторичных термопластов в комплексе с целевыми добавками.

Установлено, что введение во вт. АБС-пластик вт. ПЭВП и вт. ПЭНП в целом негативно сказывается на комплексе физико-механических характеристик композитов (рис. 1). Так, разрушающее напряжение при растяжении падает на 20–50 %, относительное удлинение снижается на 10–20 %, ударная вязкость – на 5–45 %. Это связано с высоким различием показателя текучести расплава (ПТР) компонентов смеси: если вт. АБС имеет ПТР в пределах 20 г/10 мин, то вт. ПЭНП и вт. ПЭВП – в диапазоне 4–5 г/10 мин. Вследствие этого в процессе совместной переработки напряжения сдвига полимеров в расплаве не способствуют равномерному распределению полимерных компонентов в объеме смеси. Микрообъемы ПЭНП и ПЭВП, фактически выступая в роли полимерного наполнителя основной матрицы АБС, образуют локальные участки, по существу являющиеся дефектами матрицы и служащие концентраторами напряжений. При этом количество таких дефектных зон возрастает с увеличением содержания этих компонентов.

При введении во вт. АБС-пластик добавок сополимера этилена с винилацетатом (СЭВ) происходит монотонное снижение показателей свойств материала (рис. 2). По-видимому, это связано с отсутствием совместимости полимеров в пределах технологических режимов переработки, что приводит к разуплотнению материала. В то же время при введении СЭВ в смесь вт. АБС-пластика со

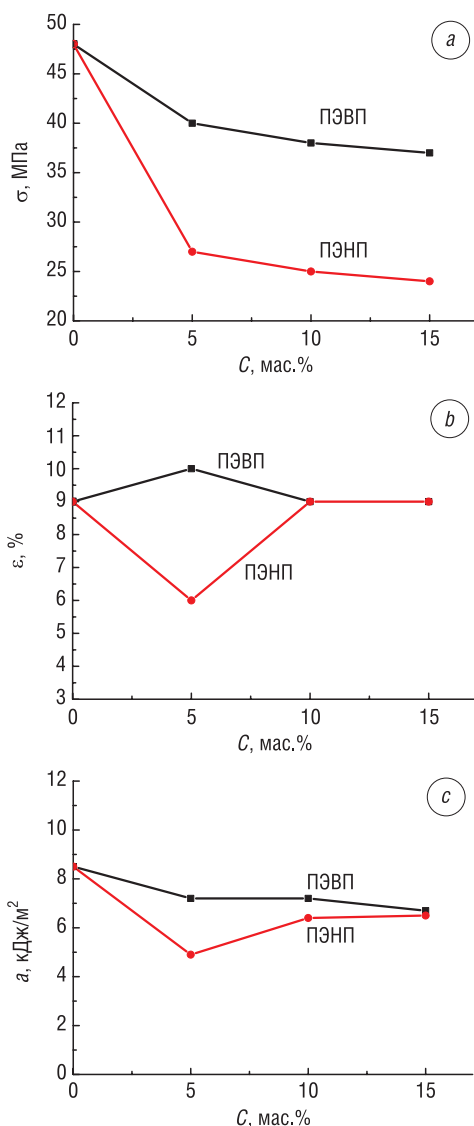


Рис. 1. Влияние содержания вт. ПЭВП и вт. ПЭНП в композите (вт. АБС-пластик + вт. ПЭВП; вт. АБС-пластик + вт. ПЭНП) на его физико-механические характеристики: *a* – разрушающее напряжение при растяжении, σ , МПа; *b* – относительное удлинение при растяжении, ε , %; *c* – ударная вязкость (по Шарпи), a , кДж/м²

Fig. 1. The influence of the secondary LDPE and secondary HDPE concentration in the composite (secondary ABS plastic + secondary LDPE; secondary ABS plastic + secondary HDPE) on its physico-mechanical characteristics: *a* – tensile stress, σ , МПа; *b* – tensile strain, ε , %; *c* – impact strength (according to Charpy), a , кДж/м²

вт. ПЭНП и вт. ПЭВП наблюдается повышение прочности композита на 18–25 %, что указывает на эффективность использования добавки СЭВ в смесях полимеров.

Показано, что использование вт. ПУ, вт. ПС и вт. ПП в качестве наполнителя во вт. АБС матрице оказывает положительное воздействие на прочностные свойства полимерной смеси. Так, при введении во вт. АБС-пластик вт. ПУ (рис. 3) на фоне стабильных показателей разрушающего напряжения при растяжении и относительного удлинения наблюдается возрастание на 20–25 % ударной вязкости смеси, что обусловлено характерными для ПУ высокими показателями вязкоупругих свойств.

При использовании в качестве наполнителя во вт. АБС-пластике вт. ПС либо вт. ПП (рис. 4) отмечается возрастание на 10–20 % разрушающего напряжения при растяжении образцов ком-

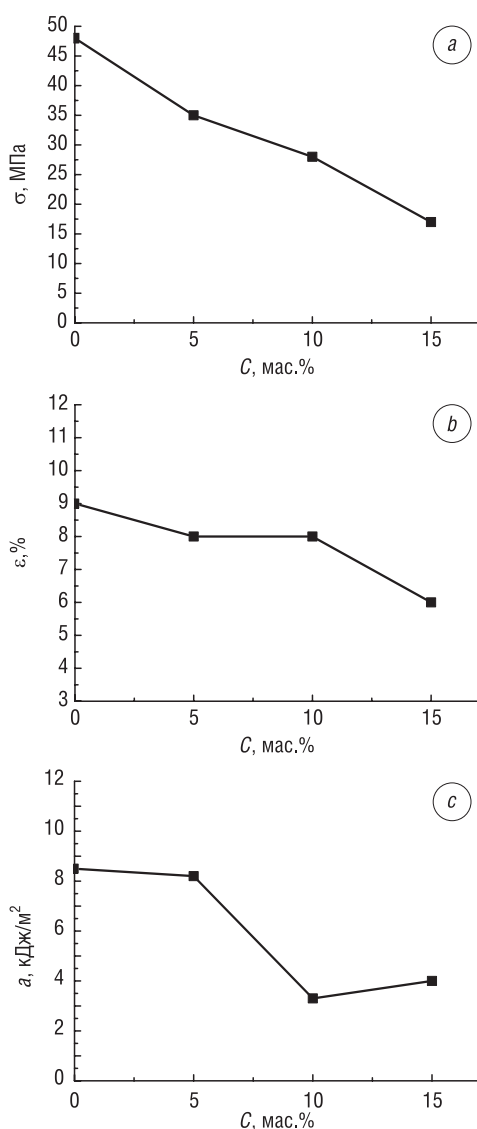


Рис. 2. Влияние содержания СЭВ в композите (вт. АБС-пластик + СЭВ) на его физико-механические характеристики: *a* – разрушающее напряжение при растяжении, σ , МПа; *b* – относительное удлинение при растяжении, ϵ , %; *c* – ударная вязкость (по Шарпи), a , кДж/м²

Fig. 2. The influence of sevilen concentration in the composite (secondary ABS plastic + EVA) on its physical and mechanical characteristics: *a* – tensile stress, σ , МПа; *b* – tensile strain, ϵ , %; *c* – impact strength (according to Charpy), a , кJ/m²

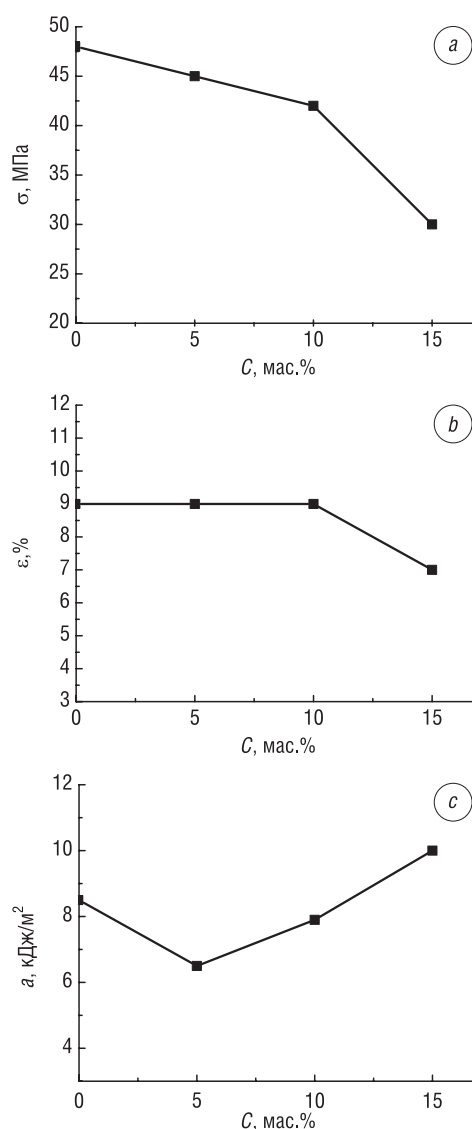


Рис. 3. Влияние содержания вт. ПУ в композите (вт. АБС-пластик + вт. ПУ) на его физико-механические характеристики: *a* – разрушающее напряжение при растяжении, σ , МПа; *b* – относительное удлинение при растяжении, ϵ , %; *c* – ударная вязкость (по Шарпи), a , кДж/м²

Fig. 3. The influence of the secondary PU concentration in the composite (secondary ABS plastic + secondary PU) on its physical and mechanical characteristics: *a* – tensile stress, σ , МПа; *b* – tensile strain, ϵ , %; *c* – impact strength (according to Charpy), a , кJ/m²

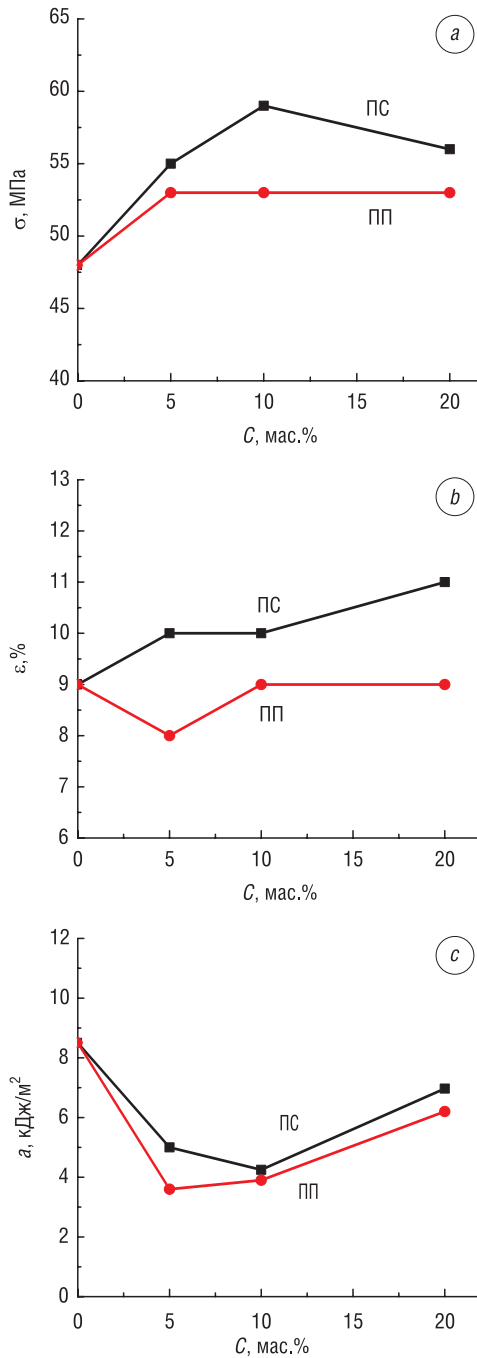


Рис. 4. Влияние содержания вт. ПС и вт. ПП в композите (вт. АБС-пластик + вт. ПС; вт. АБС-пластик + вт. ПП) на его физико-механические характеристики: *a* – разрушающее напряжение при растяжении, σ , МПа; *b* – относительное удлинение при растяжении, ϵ , %; *c* – ударная вязкость (по Шарпи), a , кДж/м²

Fig. 4. The influence of the secondary PS concentration and the secondary PP in the composite (secondary ABS plastic + secondary PS; secondary ABS plastic + secondary PP) on its physical and mechanical characteristics: *a* – tensile stress, σ , МПа; *b* – tensile strain, ϵ , %; *c* – impact strength (according to Charpy), a , кДж/м²

позита при незначительном (на 5–10 %) снижении показателя относительного удлинения. Повышение прочности композиций обусловлено, по-видимому, тем, что в процессе переработки полимерных смесей вт. ПС и вт. ПП выступают в роли армирующего элемента композиционной системы. Полученный материал может успешно применяться при производстве длинномерных изделий (например, труб), где важным показателем является ударная вязкость. Также такого рода композиты можно использовать при производстве целого ряда технически необходимых, но при этом малоответственных конструкционных элементов, например полимерной тары, предназначенной для хранения и перемещения продукции растениеводства. При этом технологичность переработки полимерных смесей, а также внешний вид, состояние поверхности и относительная формоустойчивость отливок из всех вышеперечисленных полимерных смесей оцениваются как удовлетворительные.

На рис. 5 видно, что введение в полимерную смесь вт. АБС-пластик + вт. ПП 1–5 мас.% ультрадисперсного наполнителя (диоксида кремния) ведет к монотонному снижению прочностных свойств композита. Однако при

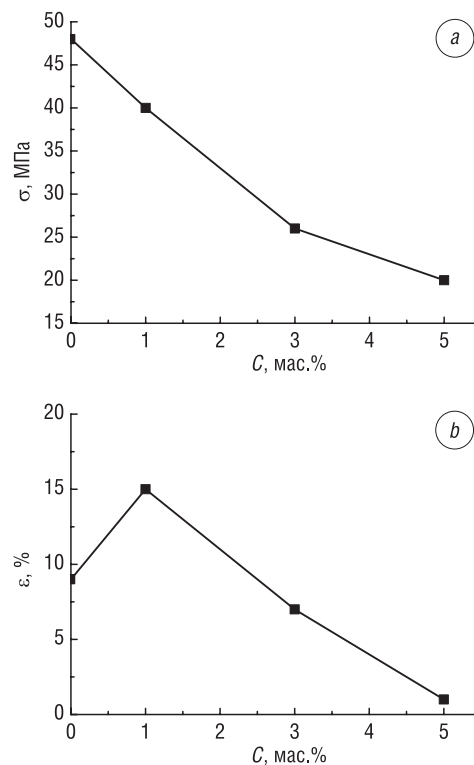


Рис. 5. Влияние содержания ультрадисперсного наполнителя (диоксида кремния) в композите (вт. АБС-пластик + вт. ПП) на его физико-механические характеристики: *a* – разрушающее напряжение при растяжении, σ , МПа; *b* – относительное удлинение при растяжении, ϵ , %

Fig. 5. The influence of the ultrafine filler (silicon dioxide) concentration in the composite (secondary ABS plastic + secondary PP) on its physical and mechanical characteristics: *a* – tensile stress, σ , МПа; *b* – tensile strain, ϵ , %

наполнении 1 мас.% фиксируется скачок величины относительного удлинения при разрыве (на 65 %). По-видимому, введение диоксида кремния способствует увеличению содержания в полимерной матрице аморфных областей, которые, контактируя с дисперсным наполнителем, придат композиту избыточную хрупкость на межфазных границах, благодаря чему роль деформационной составляющей растёт. При этом концентрация наполнителя в 1 % может быть представлена как оптимальная для такого структурирования в микрообъемах композита, которое влияет на улучшение реологической составляющей свойств вследствие близких значений ПТР вт. АБС-пластика и вт. ПП. Это косвенно подтверждается снижением показателя крутящего момента (на 30 %) при переработке таких смесей на экструзионном оборудовании.

Для получения ответственных изделий (например, полимерных труб) необходимым требованием применения таких материалов в их производственном цикле являются повышенные показатели прочностных и деформационных свойств. Поэтому для производства данного рода изделий разработан рецептурный состав на основе смесей вторичных полиэтиленов (вт. ПЭ) с добавлением ультрадисперсных частиц диоксида кремния (Аэросила, табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Физико-механические характеристики композитов на основе смесей вторичных полиэтиленов двух типов

Table 1. Physico-mechanical characteristics of composites based on mixtures of two types secondary polyethylene

Показатель	Композит	
	вт. ПЭНП 70 % + вт. ПЭВП 30 %	вт. ПЭНП 70 % + вт. ПЭВП 28,5 % + Аэросил 1,5 %
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	18	36
Деформация при разрыве, %	280	100
Модуль упругости, МПа	120	300

Установлено, что полученная смесь имеет прочность в 1,5–2 раза выше, чем индивидуальные вт. ПЭВП или вт. ПЭНП. Это обусловлено, во-первых, повышением вероятности формирования поперечных сшивок макромолекул в композиционной системе вследствие более интенсивного протекания окислительных реакций, инициирующих этот процесс при переработке вторичных полиолефинов. Во-вторых, в исследуемой системе реализуется активационный эффект при совместном воздействии нормальных и касательных напряжений, которые естественно сопровождают реальный экструзионный процесс. В результате создаются предпосылки для активации высокодисперсных частиц Аэросила в композиционной системе, что обеспечивает высокую степень упорядочения структуры на надмолекулярном уровне и, как следствие, повышение значений прочностных характеристик композита в целом. На базе предложенного рецептурного состава разработаны предназначенные для получения труб различных диаметров композиты с механическими и технологическими свойствами, которые представлены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Механические и технологические свойства смесевых композиций на основе вторичных полиолефинов

Table 2. Mechanical and technological properties of mixed compositions based on secondary polyolefins

Показатель	Состав №1	Состав №2	Состав №3
Разрушающее напряжение при растяжении, МПа	18	31	45
Модуль упругости при растяжении, МПа	26	184	200
Деформация при разрыве, %	270	75	90
ПТР, г/10 мин	4,2	3,5	3,3

П р и м е ч а н и е. Состав №1 – вт. ПЭНП 70%/вт. ПЭВП 30%; состав №2 – 20 % дисперсия SiO₂ в смеси растворителя с изопропиловым спиртом + смесь вт. ПЭНП 70%/вт. ПЭВП 30%; состав №3 – 20 % дисперсия SiO₂ в смеси толуола с изопропиловым спиртом + смесь вт. ПЭНП 70%/вт. ПЭВП 30 %.

Т а б л и ц а 3. Прочностные свойства полимерпесчаных композиций

Table 3. Strength properties of polymer-mineral compositions

Состав композиции, мас. %	Разрушающее напряжение при сжатии, МПа
вт. ПЭНП 40 % + песок 60 %	34
вт. ПЭНП 38 % + песок 60 % + вт. АБС 2 %	39
вт. ПЭНП 35 % + песок 60 % + вт. АБС 5 %	37
вт. АБС 15 % + АБС 15 % + песок 70 %	12
вт. АБС 14 % + вт. ПП 15 % + песок 70 % + антиоксидант 1 %	1,6
вт. АБС 15 % + ПУ 15 % + песок 70 %	10
вт. АБС 15 % + вт. ПЭНП 15 % + песок 70 %	3,7

смесей вт. АБС-пластика с вт. ПП и вт. ПЭ (табл. 3), где характерно существенное снижение физико-механических характеристик материала и увеличение его вязкости при перемешивании и гомогенизации смеси в лабораторном устройстве. При совмещении вт. АБС-пластика с вт. ПУ наблюдается также характерное в таких композициях ухудшение прочностных свойств материала в 3–3,5 раза, что указывает на неэффективность использования данных смесей в производстве полимерпесчаных композиций.

Заключение. Поведение вторичных полимеров в смесях друг с другом обусловлено сочетанием их реологических характеристик и других параметров взаимной совместимости. Возникает ситуация, в которой одни полимеры фактически являются модификаторами других полимеров, влияя на фазовый состав друг друга и взаимную упорядоченность микрофаз. На основе полученных результатов можно предположить, что дисперсный неорганический модификатор при определенных концентрациях способен выполнять роль структурирующего компонента. Эта предположение соответствует ранее выявленным для подобных композиций закономерностям. Целенаправленное регулирование реологических свойств компонентов композиционной системы с помощью функциональных добавок разной природы обеспечит достижение приемлемых и воспроизводимых физико-механических характеристик и технологических показателей процесса их формирования, что создает предпосылки для производства конкурентоспособных изделий с высоким гарантированным сроком службы без применения дефицитного первичного сырья.

Список использованных источников

1. Шаповалов, В.М. Многокомпонентные полимерные системы на основе вторичных материалов / В.М. Шаповалов, З.Л. Тартаковский; под общ. ред. Ю.М. Плескачевского. – Гомель: ИММС НАН Беларуси, 2003. – 262 с.
2. Ла Мантия, Ф. Вторичная переработка пластмасс / Ф. Ла Мантия (ред.); пер. с англ. под ред. Г.Е. Заикова. – СПб.: Профессия, 2007. – 400 с.
3. Клинков, А.С. Утилизация и вторичная переработка полимерных материалов: учеб. пособие / А.С. Клинков, П.С. Беляев, М.В. Соколов; под ред. Е.С. Мордасова. – Тамбов: Тамбов. гос. техн. ун-т, 2005. – 80 с.
4. Шах, В. Справочное руководство по испытанию пластмасс и анализу причин их разрушения / В. Шах. – СПб.: Научные основы и технологии, 2006. – 600 с.
5. Рауендаль, К. Экструзия полимеров / К. Рауендаль; пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Профессия, 2006. – 768 с.
6. Добавки для полимеров и суперконцентраты модификаторы [Электронный ресурс] // Policontra Belarus. – 2019. – Режим доступа: <http://www.polikonta.com/index.php?softpg=129> – Дата доступа: 20.06.2019.

Предварительно проведенные исследования показали, что наилучшими физико-механическими свойствами в ряду полимерпесчаных композитов обладают образцы с использованием в качестве полимерной матрицы вт. ПЭ с добавкой вт. АБС-пластика (табл. 3). Установлено, что добавка вт. АБС-пластика во вт. ПЭ приводит к возрастанию прочности композиции на 10–15 %, что, по-видимому, можно объяснить армирующим эффектом более жестких частиц вт. АБС-пластика в микрообъеме полимерной матрицы. При использовании в качестве полимерной матрицы только вт. АБС-пластика наблюдается снижение прочностных свойств композита вследствие плохой совместимости полимера и кремниевоего песка. Такое положение наблюдается и для

References

1. Shapovalov V. M., Tartakovskiy Z. L. *Multicomponent Polymer Systems Based on Secondary Polymers*. Gomel, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus, 2003. 262 p. (in Russian).
2. La Mantija F. (ed.). *Plastics Resycling*. St.-Petersburg, Professiya Publ., 2007. 400 p. (in Russian).
3. Klinkov A. S., Beljaev P. S., Sokolov M. V. *Utilization and Recycling of Polymeric Materials*. Tambov, Tambov State Technical University, 2005. 80 p. (in Russian).
4. Shakh V. *Reference Guide for Plastics Testing and Analizing the Causes of their Destruction*. St.-Petersburg, Nauchnye osnovy i tekhnologii Publ., 2006. 600 p. (in Russian).
5. Rauvandal K. *Extrusion of Polymers*. St.-Petersburg, Professiya Publ., 2006. 768 p. (in Russian).
6. Additives for polymers and masterbatch modifiers. *Policonta Belarus*. Available at: <http://www.polikonta.com/index.php?softpg=129> (accessed 20 June 2019).

Информация об авторах

Тимофеенко Алена Александровна – соискатель, младший научный сотрудник отдела «Композиционные материалы и рециклинг полимеров», Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: timoshenko13@gmail.com

Тимошенко Вадим Васильевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела «Композиционные материалы и рециклинг полимеров», Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: twadim@tut.by

Шутова Екатерина Адамовна – аспирант, Мозырский государственный педагогический университет имени И. П. Шамякина (ул. Студенческая, 28, 247760, Мозырь, Гомельская область, Республика Беларусь). E-mail: katsiarynashutava@mail.ru

Шаповалов Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, заведующий отделом «Композиционные материалы и рециклинг полимеров», Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: v.shapovalov@tut.by

Information about the authors

Aliona A. Timofeenko – Applicant, Junior Researcher, Composite Materials and Polymer Recycling Department, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: timoshenko13@gmail.com

Vadim V. Timoshenko – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, Composite Materials and Polymer Recycling Department, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: twadim@tut.by

Ekaterina A. Shutova – Postgraduate Student, Mozyr State Pedagogical University named after I. P. Shamyakin (28, Studencheskaya Str., 247760, Mozyr, Gomel region, Republic of Belarus). E-mail: katsiarynashutava@mail.ru

Viktor M. Shapovalov – D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Composite Materials and Polymer Recycling Department, V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: v.shapovalov@tut.by

В. А. Емельянов, В. В. Баранов, В. В. Емельянов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск, Республика Беларусь

МНОГОСЛОЙНЫЕ ТОКОПРОВОДЯЩИЕ ПЛЕНКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Аннотация. Исследовано явление стресс-миграции в пленках сплава Al–Si, которое проявляется при протекании тока высокой плотности (порядка 10^5 А/мм²). По результатам исследований предлагается техническое решение, которое позволяет повысить качество получаемых пленочных структур. Его сущность заключается в формировании в пленках ловушек для мигрирующих атомов алюминия при протекании тока высокой плотности за счет формирования пассивирующего слоя TiN на поверхности слоя, например Al–1,5 %Si. При наличии развитого рельефа поверхности современных интегральных микросхем, например с субмикронными размерами элементов топологии, толщина и структура металлических токопроводящих пленок на ступеньках рельефа отличается от расположенных на планарных участках. Это приводит к появлению существенных градиентов механических напряжений, которые являются движущей силой стресс-миграции. Температурный коэффициент линейного расширения алюминия примерно в 20 раз больше, чем диоксида кремния, что обуславливает активную генерацию точечных дефектов в слое сплава на основе алюминия, который намного пластичнее диоксида кремния. Под действием градиента остаточных напряжений существующие в пленках точечные дефекты, например, вакансии, приходят в движение преимущественно по границе раздела металл–диэлектрик и со временем под влиянием тока высокой плотности приводят к образованию групповых дефектов в пленке сплава, в частности пустот, бугорков и др. Так как процессы стресс-миграции на этих участках происходят наиболее интенсивно, то в результате происходит разрыв пленок преимущественно на ступеньках топологического рельефа. Результаты исследования прошли апробацию и могут быть использованы при изготовлении кремниевых полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.

Ключевые слова: многослойные тонкие пленки, стресс-миграция, рельеф поверхности, ловушки для мигрирующих атомов алюминия, апробация на интегральных микросхемах

Для цитирования: Емельянов, В. В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 170–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-170-176>

Viktor A. Emelyanov, Valentin V. Baranov, Viktor V. Emelyanov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus

MULTILAYERED CONDUCTIVE FILMS OF SEMICONDUCTOR DEVICES AND INTEGRATED CIRCUITS

Abstract. The stress-migration phenomenon in films of alloy Al–Si which is observed at a current of high density (an order 10^5 A/mm²) is investigated. By results of researches the technical decision which allows quality raise of obtained film structures is offered. Its essence consists in formation in films the traps for migrating atoms of aluminium at course of a current of high density at the expense of formation the passive layer of TiN on the metal layer surface, for example, Al–1,5 %Si. In the presence of advanced relief of a surface of modern integrated circuits, for example with sub-micron sizes of the topology elements, the thickness and structure of metal current-carrying films on relief steps differs from what are located on planar sites. It leads to occurrence of essential gradients of mechanical pressure which are stress-migration motive power. As it is known, that temperature factor of linear expansion of aluminium is approximately 20 times, than SiO₂, that causes active generation of dot defects in a layer of the alloy on the base of aluminium which is much more plastic than SiO₂. Under the influence of a gradient of residual pressure, dot defects, existed in films, for example vacancies, come to movement mainly on border of metal – dielectric and in due course under the influence of a current of high density lead to formation of group defects in an alloy film, in particular emptiness, hills etc. Since stress-migration processes on these sites occur most intensively, as a result there is a rupture of films mainly on steps of a topological relief. Results of the research have passed approbation and can be used at manufacturing of silicon semi-conductor devices and integrated microcircuits.

Keywords: multilayered thin films, stress-migration, a relief of a surface, a trap for migrating atoms of aluminium, approbation on integrated microcircuits

For citation: Emelyanov V. A., Baranov V. V., Emelyanov V. V. Multilayered conductive films of semiconductor devices and integrated circuits. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnych navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 170–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-170-176>

Введение. Уменьшение топологических размеров элементов полупроводниковых приборов и рост степени интеграции интегральных микросхем (ИМС), в том числе с целью экономии площади кристаллов на пластинах монокристаллического кремния, приводит к значительному увеличению в применяемых в приборах и ИМС металлических пленках градиентов механических напряжений [1, 2]. Это преимущественно связано с тем, что одна и та же величина напряжений, обусловленная различной природой контактирующих материалов и особенностями их формирования, локализуется на меньшей площади. Релаксация напряжений в различных материалах, как правило, протекает через их структурно-фазовые превращения. При этом наиболее подвержены таким изменениям материалы, характеризующиеся высокой пластичностью, так как энергия активации данных процессов в них меньше.

В структуре современных ИМС наиболее пластичным материалом является алюминий и его сплавы, используемые для формирования электрических межэлементных соединений и контактирующие, как правило, с упругими слоями на основе диоксида или нитрида кремния. Релаксация механических напряжений в таких многослойных структурах протекает преимущественно через изменение размера зерна металлической пленки, сопровождаемое стресс-миграцией (массоперенос материала пленки под действием механических напряжений) атомов алюминия [3]. Наличие развитого рельефа ИМС способствует увеличению градиентов механических напряжений и усилению стресс-миграции в системах межсоединений. Это приводит к возникновению дефектов металлической пленки в виде аномально больших зерен и полостей, являющихся причиной коротких замыканий и обрывов и в итоге отказов функционирования ИМС.

Типовой процесс изготовления токопроводящих пленок полупроводниковых приборов и ИМС включает формирование на кремниевой подложке с активными областями диэлектрической пленки, преимущественно на основе оксида кремния, образование в этой пленке контактных окон к активным областям, нанесение пленки алюминия и создание топологического рисунка [1].

Недостатками такой системы токопроводящих пленок являются высокая взаимная растворимость материала пленки (алюминия) и материала подложки (кремния) и значительный массоперенос материала пленки под воздействием механических напряжений в процессе изготовления прибора. Это приводит к электрическим замыканиям $p-n$ -переходов, лежащих непосредственно под областью контакта металла с полупроводником, утонению токоведущих дорожек и их разрушению [4].

Наиболее применяемым способом снижения растворимости кремния в пленке алюминия является легирование ее кремнием. Концентрация кремния в сплаве при этом выбирается близкой к составу эвтектики (98,68 % Al + 1,32 % Si). На практике в технологии используется сплав алюминия с добавкой 1,5 % кремния (АК 1,5). Поэтому в дальнейшем термин «сплав алюминия с кремнием» предполагает именно такой состав, если не оговаривается иной. Технология изготовления таких пленок с использованием сплавов алюминия с добавкой 1–3 % кремния практически не отличается от технологии получения пленок чистого алюминия. Единственным отличием такого способа является проведение дополнительной операции по удалению кремниевой крошки с поверхности структур после травления пленки сплава.

Наличие кремния в пленке алюминия замедляет процесс растворения материала подложки в пленке. Однако, как оказалось, и такой способ обладает практически теми же недостатками, что и предыдущий, хотя и в меньшей степени. Это связано с тем, что процесс растворения кремния в алюминии сопровождается его миграцией по границе раздела алюминий/диэлектрик, при этом в качестве диэлектрика обычно используются пленки фосфоросиликатного стекла (диоксид кремния, легированный фосфором). Кроме того, алюминий хорошо взаимодействует с оксидом фосфора, входящим в состав фосфоросиликатного стекла, что приводит к повышению дефектности границы раздела металла с диэлектриком вследствие коррозии металла. Это в значительной степени способствует протеканию явлений массопереноса в материале токопроводящей системы.

Еще одним фактором, ответственным за недостатки рассматриваемой пленочной структуры, является наличие развитого рельефа современных ИМС. Толщина и структура металлизированного покрытия на ступеньках отличается от свойств покрытия на планарных участках. Это приводит уже в условиях изготовления прибора к появлению существенных градиентов механических напряжений, которые являются движущей силой самодиффузии. Процессы стресс-миграции на этих участках происходят наиболее интенсивно, поэтому разрыв дорожек металлизации наблюдается преимущественно на ступеньках топологического рельефа [5].

Методика исследования. Исследование микроструктуры и особенностей топологии многослойных пленок в составе ИМС мы проводили методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) при помощи аппарата Hitachi S 4800 (Япония).

Контроль электрофизических параметров кристаллов ИМС осуществлялся с использованием зондовой станции Cascade (США), а электрических параметров ИМС после сборки – при помощи комплекса Agilent B 1500 A (США). В качестве примера на рис. 1 показана микрофотография фрагмента ИМС с субмикронными проектными нормами.

Дальнейшим шагом на пути снижения массопереноса в токопроводящих системах ИМС является использование барьерных слоев. В качестве контактных к кремнию слоев для субмикронных ИМС используются силициды переходных металлов, в частности PtSi. На рис. 2 приведена микрофотография скола твердотельной структуры Si/PtSi/Mo, которая используется для формирования контактов в таких ИМС. В данной структуре барьерным слоем является Mo. Из рисунка видно, что граница раздела между монокристаллическим кремнием и PtSi неоднородна, а для приборов типа диодов Шоттки это имеет принципиальное значение, так как установлено, что при более однородной границе раздела снижается уровень обратных токов в приборах [6].

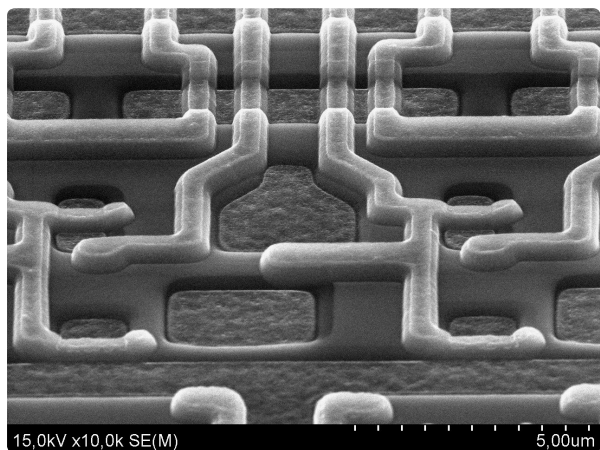


Рис. 1. Микрофотография участка интегральной микросхемы с субмикронными проектными нормами, полученная с помощью РЭМ

Fig. 1. Microphoto of site of integrated circuit with sub-micron design norms (obtained with use of SEM)

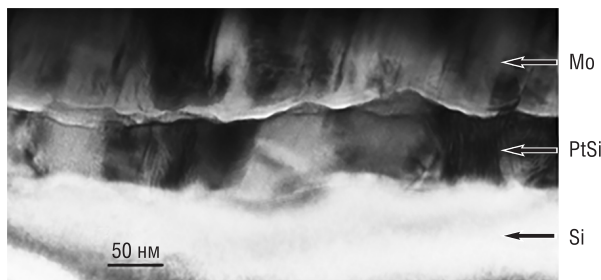


Рис. 2. Микрофотография скола твердотельной структуры диода Шоттки типа Si/PtSi/Mo

Fig. 2. Microphoto of solid-state structure Si/PtSi/Mo of diode Shottki

Также известен способ изготовления многослойных металлических пленок кремниевых полупроводниковых приборов, включающий создание на кремниевой пластине с активными областями диэлектрической пленки на основе диоксида кремния, формирование в диэлектрической пленке контактных окон к активным элементам, нанесение барьерного слоя толщиной 0,005–0,050 мкм, последующее нанесение пленки сплава алюминия с кремнием толщиной 0,5–2,0 мкм, создание топологического рисунка пленки и заключительную термообработку [6]. В качестве барьерного слоя данный способ предполагает использование гидрогенизированного аморфного кремния (патент Республики Беларусь 9585 «Способ изготовления системы металлизации кремниевых полупроводниковых приборов», автор А. В. Емельянов).

Результаты и обсуждение. Недостатком указанного способа является относительно невысокая устойчивость к массопереносу алюминия под действием остаточных механических напряжений в структуре. Проблема усложняется тем, что современные многослойные токопроводящие системы характеризуются чрезвычайно малыми размерами и сложной архитектурой. В зависимости от фактической конструкции прибора, формы кристалла и ряда технологических факторов

на одном и том же кристалле могут присутствовать как области сжатия, так и области растяжения. Это обуславливает возникновение движущей силы самодиффузии алюминия, образование дефектов металлической пленки в виде ямок и холмиков и снижение надежности. Увеличение размеров этих дефектов сверх размеров токоведущих дорожек приводит к отказу прибора ввиду коротких замыканий либо обрывов. Любые попытки снизить величину остаточных напряжений в целом либо компенсировать их нанесением новых слоев лишь обостряют ситуацию, что приводит к дополнительному перераспределению остаточных напряжений по площади кристалла и пластины в целом и возникновению новых областей высоких градиентов напряжений. Данное явление известно как стресс-миграция при плотностях тока выше 10^5 А/мм² и описано в [7].

В ходе исследования выявлялись способы повышения качества получаемых токопроводящих пленок за счет повышения их устойчивости к стресс-миграции.

Предложенный нами способ изготовления пленок для кремниевых полупроводниковых приборов и ИМС включает формирование барьерного слоя толщиной 0,005–0,050 мкм, нанесение пленки сплава алюминия толщиной 0,5–2,0 мкм, формирование требуемой топологии и последующую термообработку. После нанесения пленки сплава алюминия на ней формируют пассивирующий слой нитрида титана толщиной 0,02–0,10 мкм. Цель данного технического решения – формирование ловушек для мигрирующих атомов алюминия.

Известно, что процесс массопереноса под воздействием остаточных напряжений протекает преимущественно вблизи поверхности металлической пленки как наиболее дефектной области. Это объясняется как свойствами непосредственно поверхности металла, так и влиянием контактирующих слоев с разными физическими свойствами. Применение разнообразных диэлектрических пленок на поверхности алюминия, в частности диоксида или нитрида кремния, существенно снижает скорость массопереноса. Данный факт объясняется пассивацией несвязанных электронов приповерхностных атомов алюминия, что снижает их электрическую активность и диффузионную подвижность. Однако в связи с тем, что создание высокостабильных приборов предполагает, как правило, длительную (4–6 ч и более) термическую обработку полностью изготовленных структур, а алюминий является химически достаточно активным элементом, то контакт алюминия с диэлектриком, например диоксидом кремния, приводит к «раскислению» последнего с образованием свободного кремния и оксида алюминия. Высвободившийся кремний растворяется в слое сплава алюминия, тем самым способствуя возникновению новых точечных дефектов, а образовавшийся оксид алюминия выступает центром зарождения новых дефектов типа алюмосиликатов за счет его взаимодействия с диоксидом кремния. К тому же оксид алюминия выступает как соединение с ионным типом химической связи, что обуславливает его участие в процессах массопереноса за счет обменных процессов по типу $2Al^* + Al_2O_3 = 2Al + Al^*_2O_3$, когда металл и его оксид обмениваются атомами. Оба этих фактора приводят к снижению стабильности и надежности токопроводящих систем с диэлектрическими пассивирующими слоями. Высокая жесткость диэлектрических пленок способствует возникновению в них высоких остаточных напряжений и усилению стресс-миграции.

При использовании нитрида титана в качестве пассивирующего слоя на пленке сплава алюминия мигрирующие атомы алюминия взаимодействуют с ним с образованием нитрида алюминия и высвобождением атомов титана. Нитрид титана является нестехиометрическим соединением с избытком атомов титана, поэтому возникновение дополнительных высвободившихся в результате реакции атомов титана в данном слое либо на границе его раздела с алюминием протекает практически незамеченным. Диффузия титана в алюминий по сравнению с диффузией кремния также не приводит к заметному изменению электропроводности. Нитрид алюминия является соединением с ковалентным типом связи, что существенно снижает вероятность образования атомов алюминия и делает невозможным его участие в упомянутых обменных процессах. К тому же нитрид алюминия играет роль полупроводника, что позволяет минимизировать потерю электропроводности системы в целом.

Из сказанного можно заключить, что пленка нитрида титана является своеобразной ловушкой для мигрирующих атомов алюминия, что существенно снижает стресс-миграцию в твердотельной структуре. Кроме этого, нитрид титана высокотехнологичен, хорошо совместим с контактирующими слоями и по сравнению с распространенными диэлектрическими пленками

достаточно пластичен. Данные свойства позволяют нитриду титана выступать демпфером между алюминием и пленкой диэлектрика, существенно нивелирующим различие в остаточных напряжениях по площади структуры.

Таким образом, пленки нитрида титана обладают необходимым комплексом свойств, позволяющим максимально нивелировать неравномерность остаточных напряжений и надежно пассивировать слой пленки сплава алюминия.

Выбор толщины слоя нитрида титана основан на экспериментальных данных. При толщине слоя менее 0,02 мкм, например, 0,01 мкм, эффективность пассивации заметно снижается, так как в результате процессов рекристаллизации возникают отдельные области контакта сплава алюминия с диэлектриком с образованием сопутствующих дефектов и усилением массопереноса. Увеличение толщины слоя нитрида титана выше 0,1 мкм, например до 0,2 мкм, повышает себестоимость, а дополнительных преимуществ не дает.

Сущность предложенного технического решения поясняется рис. 3–5. Так, на рис. 3 представлено поперечное сечение формируемой твердотельной структуры в составе полупроводникового прибора.

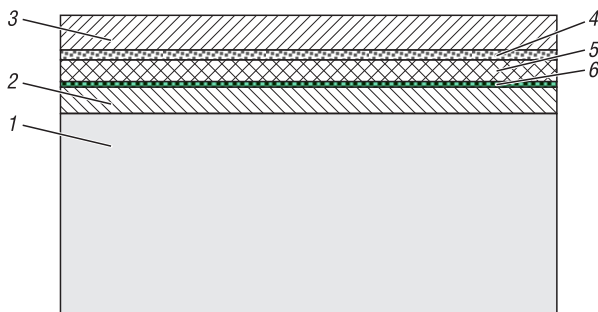


Рис. 3. Поперечное сечение формируемой твердотельной структуры в составе полупроводникового прибора: 1 – полупроводниковая пластина с активными элементами, 2 – нижний слой диэлектрика, 3 – верхний слой диэлектрика, 4 – барьерный слой, 5 – слой сплава алюминия, 6 – пассивирующий слой

Fig. 3. Cross-section of formed solid-state structure as a part of semiconductor device: 1 – a semiconductor plate with active elements, 2 – the bottom layer of dielectric, 3 – the top layer of dielectric, 4 – a barrier layer, 5 – a layer of an alloy of aluminium, 6 – the passive layer

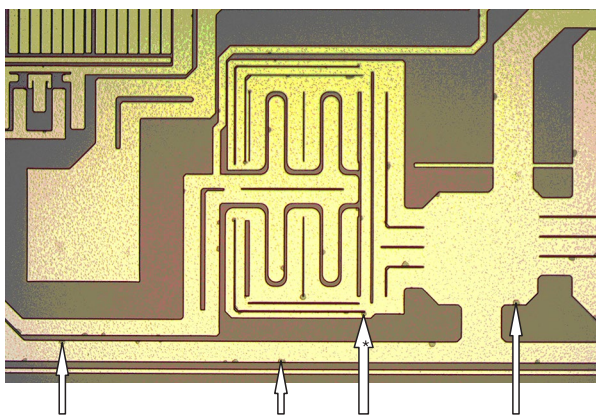


Рис. 4. Фотография фрагмента поверхности структуры, полученной по стандартному способу с наблюдаемыми дефектами

Fig. 4. Photo of a fragment of a surface of the structure obtained by a the standard way with observable defects

В нижнем слое диэлектрика 2, выполняющем роль межуровневой изоляции, сформированы контактные окна (на рисунке не показаны) к активным элементам полупроводниковой пластины. В верхнем слое диэлектрика 3, выполняющем обычно защитную функцию, сформированы контактные окна (также не показаны) к контактными площадкам токопроводящих дорожек, состоящих из последовательно сформированных барьерного слоя 4, слоя сплава алюминия 5 и пассивирующего слоя 6, выполненного из нитрида титана толщиной 0,02–0,10 мкм.

Уменьшение стресс-миграции атомов алюминия при формировании структуры и в процессе работы полупроводникового прибора достигается за счет следующих факторов. Наличие градиента остаточных напряжений в структуре приводит к возникновению в слое сплава алюминия 5 движущей силы самодиффузии атомов алюминия. В случае отсутствия пассивирующего слоя 6 наиболее критичной областью при этом является граница раздела металла с верхним слоем диэлектрика 3.

Температурный коэффициент линейного расширения алюминия примерно в 20 раз больше, чем диоксида кремния, что обуславливает активную генерацию точечных дефектов в слое сплава алюминия 5, который намного пластичнее диоксида кремния. Под действием градиента остаточных напряжений эти точечные дефекты, а именно атомы алюминия и их вакансии, приходят в движение преимущественно по границе раздела металл–диэлектрик и со временем приводят к образованию дефектов, изображенных на рис. 4 (указаны фигурными стрелками). Размер этих дефектов в плане может превышать ширину токопроводящих дорожек. Из рис. 4 видно, что дефект,

указанный стрелкой со звездочкой, фактически привел к разрыву токоведущей дорожки.

Наличие пассивирующего слоя 6, выполненного из нитрида титана, вследствие его пластичности, с одной стороны, приводит к снижению остаточных напряжений на границе раздела металл–диэлектрик и существенно уменьшает количество точечных дефектов в слое сплава алюминия 5. С другой стороны, поскольку алюминий химически более активен по сравнению с титаном, мигрирующие атомы алюминия вступают в химическую реакцию с нитридом титана с образованием нитрида алюминия, который прочно удерживается в этом слое за счет ковалентного характера химической связи. Именно по этой причине нитрид титана является своеобразной ловушкой для мигрирующих атомов алюминия. Высвободившиеся атомы титана характеризуются относительно невысоким коэффициентом диффузии и не приводят к возникновению упомянутых дефектов в виде ямок или бугорков. Поверхность заявляемой токопроводящей системы, как видно из рис. 5, при этом не содержит каких-либо дефектов.

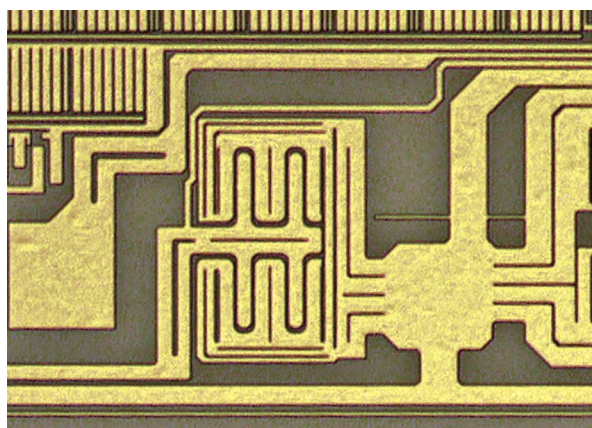


Рис. 5. Фотография фрагмента бездефектной поверхности структуры, полученной по предложенному способу, после удаления пассивирующего слоя нитрида титана
 Fig. 5. Photo of a fragment of a faultless surface of the structure obtained by the offered way, after removal the passive layer of titan nitride

Таким образом, формирование пассивирующего слоя нитрида титана на слое сплава алюминия способствует нивелированию остаточных напряжений в структуре и улавливанию мигрирующих атомов алюминия, что существенно снижает процессы стресс-миграции в системе.

Предложенный метод реализован при изготовлении ИМС типа IZ1 990. Активные элементы структуры формировали стандартными методами в соответствии с требованиями действующей технической документации. После создания межуровневой диэлектрической изоляции и вскрытия в ней контактных окон на всю поверхность пластины на установке напыления типа Endura последовательно наносили пленку титана толщиной 20 нм, служащую барьерным слоем, пленку сплава алюминия с 0,5 % кремния толщиной 0,8 мкм, пленку нитрида титана, служащую пассивирующим слоем. Толщина слоя нитрида титана указана в таблице.

Далее стандартными методами фотолитографии и травления формировали требуемый топологический рисунок токопроводящей системы и проводили ее термообработку при 450 °С. Затем создавали диэлектрическое защитное покрытие требуемой топологической конфигурации и проводили стабилизирующую термообработку при температуре 400 °С в течение 6 ч, после чего осуществляли контроль функционирования и анализ внешнего вида (ВВ) полученных структур. Результаты контроля и анализа внешнего вида приведены в таблице.

Экспериментальные данные по выборке 1000 штук ИМС с дополнительным пассивирующим слоем
Experimental data on the sample of 1000 pieces integrated microcircuits with additional passive layer

Толщина пленки нитрида кремния, мкм	Выход годных кристаллов на контроле функционирования, %	Выход годных кристаллов на анализе ВВ, %	Количество брака по дефектам стресс-миграции токопроводящей системы, % от общего количества брака	Примечание
0,01	81	89	45	Внешний вид токопроводящей системы приведен на рис. 5
0,02	87	96	0	
0,05	92	98	0	
0,10	91	97	0	
0,20	89	94	0	
Стандартный способ	73	67	94	Превышение нормативной трудоемкости Внешний вид токопроводящей системы приведен на рис. 4

Заключение. В результате исследований микроструктуры и особенностей топологии многослойных пленок в составе полупроводниковых приборов и ИМС методом растровой электронной микроскопии при помощи аппарата Hitachi S 4800 (Япония), а также контролируя электрофизические параметры кристаллов ИМС с использованием зондовой станции Cascade (США) и электрические параметры ИМС после сборки при помощи комплекса Agilent B 1500 A (США), показано, что описанный в данной статье метод изготовления многослойной токопроводящей структуры кремниевых полупроводниковых приборов и ИМС обеспечивает более высокое качество за счет повышенной устойчивости к стресс-миграции. Полученные результаты могут быть использованы при изготовлении кремниевых полупроводниковых приборов и ИМС.

Список использованных источников

1. Баранов, В. В. Приборы твердотельной электроники, тестирование, измерения. Биомедицинские диагностические технологии / В. В. Баранов // Доклады БГУИР. – 2014. – № 2 (80). – С. 23–31.
2. Emelyanov, V. A. Evolution of VLSIs Materials and Packaging Technology Correlated with Progress of Thin Films Deposition and Outlets Bonding Methods / V. A. Emelyanov, V. V. Baranov, F. V. Emelyanov // Proceedings of the 2nd Electronics System-Integration Technology Conference – ESTC-2008. – London, 2008. – P. 779–783.
3. Колешко, В. М. Массоперенос в тонких пленках / В. М. Колешко, В. Ф. Белицкий. – Минск: Наука и техника, 1980. – 296 с.
4. Емельянов, В. А. Технология микромонтажа интегральных схем / В. А. Емельянов; под ред. В. В. Баранова. – Минск: Беларус. навука, 2002. – 335 с.
5. Достанко, А. П. Распределение остаточных механических напряжений в тонких пленках / А. П. Достанко, В. В. Баранов, Я. А. Соловьев // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2002. – Т. 46, № 4. – С. 119–122.
6. Баранов, В. В. Изделия силовой электроники, датчики, биомедицинские технологии / В. В. Баранов // Докл. БГУИР. – 2019. – № 3 (121). – С. 70–75.
7. Достанко, А. П. Пленочные токопроводящие системы СБИС / А. П. Достанко, В. В. Баранов, В. В. Шаталов. – Минск: Высш. шк., 1989. – 238 с.

References

1. Baranov V. V. Solid state devices, testing, measuring. Biomedical diagnostic technologies. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki = Doklady BGUIR*, 2014, no. 2 (80), pp. 23–31 (in Russian).
2. Emel'yanov V. A., Baranov V. V., Emel'yanov F. V. Evolution of VLSIs Materials and Packaging Technology Correlated with Progress of Thin Films Deposition and Outlets Bonding Methods. *Proceedings of the 2nd Electronics System-Integration Technology Conference – ESTC-2008*. London, 2008. Pp. 779–783. <https://doi.org/10.1109/estc.2008.4684450>
3. Koleshko V. M., Belitskii V. F. *Thin-film mass transfer*. Minsk, Nauka i tekhnika Publ., 1980. 296 p. (in Russian).
4. Emel'yanov V. A., Baranov V. V. (ed.). *Technology of micromontage of integrated circuits*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2002. 335 p. (in Russian).
5. Dostanko A. P., Baranov V. V., Solov'ev Ya. A. Residual stress distribution in thin films. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2002, vol. 46, no. 4, pp. 119–122 (in Russian).
6. Baranov V. V. Power Electronics Products, Sensors, Biomedical Technologies. *Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki = Doklady BGUIR*, 2019, no. 3 (121), pp. 70–75 (in Russian).
7. Dostanko A. P., Baranov V. V., Shatalov V. V. *VLSI Film Conductive Systems*. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1989. 238 p. (in Russian).

Информация об авторах

Емельянов Виктор Андреевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: emeljnov@bk.ru

Баранов Валентин Владимирович – доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vvb@bsuir.by

Емельянов Виктор Викторович – магистрант, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: emeljnov@bk.ru

Information about the authors

Viktor A. Emelyanov – Corresponding Member of the National Academy of Science, D. Sc. (Engineering), Professor (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: emel-jnov@bk.ru

Valentin V. Baranov – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vvb@bsuir.by

Viktor V. Emelyanov – Magister, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: emeljnov@bk.ru

С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз, С. П. Богданович

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

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ДИСПЕРГИРОВАНИЯ МОДИФИЦИРОВАННОГО СЛОИСТОГО СИЛИКАТА НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СМЕСЕВЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ ПОЛИАМИДА И ФУНКЦИОНАЛИЗИРОВАННОГО ПОЛИОЛЕФИНА

Аннотация. Изучены зависимости структуры и свойств смесей полиамида 6 (ПА6) с функционализированным полиолефином (фПО) от способа диспергирования органомодифицированной глины Cloisite 30B (C130B). Концентрация органоглины C130B в смесях ПА6/фПО была постоянной и составляла 3,0 мас.%, а содержание фПО варьировали от 10 до 50 мас.%. Компаундирование смесей осуществляли в расплаве при использовании двухшнекового экструзионного реактора-смесителя. Органоглину в состав смесей вводили двумя способами: одновременно со всеми полимерными компонентами (одностадийный процесс) и из предварительно полученного концентрата C130B в фПО (двухстадийный процесс). Установлено, что введение органоглины C130B в состав ПА6/фПО смеси по двухстадийной технологии дает возможность получать нанокomпозиты с повышенными пределом текучести (на 5–6 %), прочностью при разрыве (на 9–15 %) и относительным удлинением при разрыве (в 1,2–4 раза) по сравнению с нанокomпозитами, приготовленными по одностадийной технологии. В то же время нанокomпозиты, полученные по одностадийной технологии, в которых дисперсионную среду образует ПА6, независимо от типа надреза и способа испытаний обладают более высокой стойкостью к удару (до 1,2 раза), чем материалы, приготовленные двухстадийным способом. Это объясняется различиями в степени диспергирования нанонаполнителя и уровне межфазных взаимодействий между полимерными компонентами и наночастицами, вследствие чего изменяются кристалличность компонентов в смесях, а также комплекс их реологических и механических характеристик. Также показано, что добавки органоглины C130B независимо от способа ее введения увеличивают термостабильность ПА6/фПО смесей по сравнению с исходным ПА6. Полученные результаты могут быть использованы при разработке реальных нанокomпозитов технического назначения с улучшенными свойствами на базе ПА6 и фПО.

Ключевые слова: полиамид 6, функционализированный полиолефин, смесь полимеров, органоглина, межфазное взаимодействие, экструзионное компаундирование

Для цитирования: Песецкий, С. С. Влияние способа диспергирования модифицированного слоистого силиката на структуру и свойства смесевых композитов на основе полиамида и функционализированного полиолефина / С. С. Песецкий, Ю. М. Кривогуз, С. П. Богданович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэх. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 177–184. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-177-184>

Stepan S. Pesetskiĭ, Yuri M. Krivoguz, Sergei P. Bogdanovich

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

INFLUENCE OF THE DISPERSION METHOD OF MODIFIED LAYERED SILICATE ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF MIXED COMPOSITES BASED ON POLYAMIDE AND FUNCTIONALIZED POLYOLEFIN

Abstract. The dependences of the structure and properties of polyamide 6 (PA6) with a functionalized polyolefin (FPO) mixtures on the dispersing method of organically modified clay Cloisite 30B (C130B) were studied. The concentration of C130B organoclay in PA6/fPO mixtures was constant and amounted to 3.0 wt.%, and the content of fPO varied from 10 to 50 wt.%. Compounding of the mixtures was carried out in the melt using a twin-screw extrusion reactor-mixer. Organoclay was introduced into the composition of the mixtures in two ways: simultaneously with all polymer components (one-stage process) and from the previously obtained C130B concentrate into fPO (two-stage process). It is established that the introduction of C130B organoclay into the composition of the PA6/fPO mixture using the two-stage technology makes it possible to obtain nanocomposites with increased yield strengths (5–6 %), tensile strength (9–15 %), and elongation at break (1.2–4 times) compared with nanocomposites prepared according to a single-stage technology. At the same time, nanocomposites obtained by a single-stage technology in which PA6 forms a dispersion medium, regardless of the type of incision and the test method, have higher impact resistance (up to 1.2 times) than materials prepared by the two-stage

method. This is explained by differences in the degree of dispersion of the nanofiller and the level of interphase interactions between the polymer components and nanoparticles, as a result of which the crystallinity of the components in the mixtures changes, as well as the complex of their rheological and mechanical characteristics. It was also shown that CI30B organoclay additives, irrespective to the method of its introduction, increase the thermal stability of PA 6/fPO mixtures in comparison with the initial PA6. The results can be used in the development of real technical nanocomposites with improved properties based on PA6 and fPO.

Keywords: polyamide 6, functionalized polyolefin, polymer mixture, organoclay, interphase interaction, extrusion compounding

For citation: Pesetskii S. S., Krivoguz Yu. M., Bogdanovich S. P. Influence of the dispersion method of modified layered silicate on the structure and properties of mixed composites based on polyamide and functionalized polyolefin. *Vesti 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. 2, pp. 177–184 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-177-184>

Введение. В последнее десятилетие ассортимент термопластичных композитов технического назначения, изготавливаемых из смесей промышленно важных полимеров, значительно расширился. Смешение двух и более термопластов стало эффективным способом получения новых материалов с требуемыми свойствами [1].

Для Республики Беларусь, располагающей собственными достаточно крупными производствами полиамида 6 (ПА6) и полиолефинов (ПО), особое значения представляют смесевые композиции из данных компонентов. Смесей ПА6/ПО обладают улучшенной технологичностью, повышенной морозостойкостью и ударопрочностью. Эффект действия ПО при совмещении с ПА6 значительно усиливается благодаря функционализации ПО путем прививки к их макромолекулам активных функциональных групп, которые способны к физико-химическому взаимодействию с функциональными (концевыми аминными, карбоксильными или внутрицепными амидными) группами ПА6 и формированию прочных связей на границе раздела фаз [2, 3]. Образование прочных связей функционализированных ПО (фПО) с ПА6 предотвращает расслоение этих двух компонентов и обеспечивает устойчивую морфологию смеси, в результате чего существенно возрастают ударная вязкость, в том числе при отрицательной температуре, и способность к деформациям. Полученные изделия из смесевых композитов ПА6/фПО более надежны в эксплуатации. Кроме этого, смеси ПА6/фПО характеризуются более высокой прочностью расплава и вязкостью, что позволяет перерабатывать их по нетрадиционным для ПА6 технологиям непрерывной экструзии и экструзии с раздувом [3].

Постоянно возрастающие требования со стороны производителей и потребителей стимулируют поиск новых подходов и приемов по совершенствованию ПА6/фПО смесей. Улучшить свойства данных смесей возможно введением в их состав нанонаполнителей. Как показано в [4], для модифицирования смесей ПА6/фПО эффективно применять в качестве нанонаполнителя органомодифицированные глинистые минералы, в частности монтмориллонит.

Принципиально возможно использование двух технологий получения полимерных нанокompозитов: одностадийной, основанной на прямом смешении всех компонентов в расплаве, и двухстадийной, базирующейся на использовании концентратов (мастер-батчэй) наноглин в одном или всех компонентах смеси [5]. Последовательность смешения в общем случае может сильно сказаться на микроструктуре в нанокompозитах и повлиять на их механические и другие свойства.

Поэтому накопление экспериментальных данных, связанных с анализом влияния способов смешения при получении полимерных нанокompозитов на их структуру и свойства, представляет большой научный и практический интерес.

Целью настоящей работы является изучение зависимости структуры и свойств смесей ПА6/фПО от способа диспергирования органомодифицированного Na⁺-монтмориллонита.

Материалы и методы исследования. В качестве полимерной матрицы для получения композитов использовали ПА6 (полиамид 6 для изделий, контактирующих с пищевыми продуктами, производства ОАО «Гродно Азот», ТУ РБ 500048054.037-2002). Для его модифицирования применяли фПО, представляющий собой смесь линейного полиэтилена низкой плотности с сополимером этилена и высшего олефина, функционализированную прививкой ненасыщенной дикарбоновой кислоты (производство Института механики металлополимерных систем имени В. А. Белого НАН Беларуси, ТУ ВУ 400084698.170-2008), а также модифицированный

обработкой ПАВ Na⁺-монтмориллонит марки Cloisite 30B (Cl30B) производства Southern Clay Products Inc. (США). Свойства органоглины по данным производителя: средний размер частиц < 13 мкм, межплоскостное расстояние $d_{001} = 1,84$ нм, концентрация воды [H₂O] < 2 %, поверхностно-активных веществ [ПАВ] ≈ 30 %.

Обозначения композитов, соотношение компонентов в них и использованные технологии компаундирования приведены в табл. 1.

Как уже упоминалось, для получения композитов авторы использовали две технологии компаундирования: одностадийную и двухстадийную. Первую из них применяли для получения бинарных смесей ПА6/фПО (составы 1.2–1.4), а также однотипных составов 2.1–2.3 с добавкой 3,0 мас.% Cl30B.

Двухстадийное компаундирование использовали для осуществления преимущественной локализации Cl30B в фазе фПО. Для этого на первой стадии компаундирования органоглину определенной концентрации вводили в фПО для получения концентрата. На второй стадии компаундирования к ПА6 добавляли концентрат Cl30B в фПО в количестве, требуемом для получения составов 3.1–3.3, и производили реакционное смешение компонентов в экструзионном реакторе-смесителе, как и в [6], на базе двухшнекового экструдера TSSK-35/40 с однонаправленным вращением шнеков.

Перед компаундированием гранулят ПА6 предварительно высушивали до остаточной влажности не более 0,1 %. Органоглину сушили в вакууме непосредственно перед компаундированием при температуре 110 °С в течение 2 ч во избежание сорбции воды из воздуха при ее хранении. Температура материального цилиндра экструдера в основных смесительных секциях (IV–VIII) составляла 250 °С. Полученные полиамидные композиты высушивали при температуре 100 °С до остаточной влажности ≤ 0,12 % и использовали для определения реологических характеристик, а также получения экспериментальных образцов литьем под давлением на термопластавтомате EN-30 (Тайвань, объем впрыска 30 см³). Температура литья составляла 245 °С, литьевой формы – 40 °С.

Реологическое поведение расплавов анализируемых материалов оценивали по значениям показателя текучести расплава (ПТР), определяемого на приборе 5MPCA фирмы RAY-RAN TEST EQUIPMENT Ltd (Великобритания) в соответствии с ГОСТ 11645-73 при температуре 250 °С и нагрузке 21,6 Н (диаметр капилляра 2,095 мм, длительность выдержки расплава в плавильном цилиндре прибора 4 мин).

Испытания методом растяжения проводили на универсальной машине Instron 5567 (Великобритания) при скорости нагружения 50 мм/мин. Образцы представляли собой лопатки типа 1BA с размером шейки 45 × 5 × 2 мм в соответствии с ГОСТ 11260-2017.

Для испытаний методом ударного разрушения по Шарпи (ГОСТ 4647–2015) использовали бруски размером 80 × 10 × 4 мм с нанесенными на них острым и прямоугольным плоскими надрезами. Те же бруски с боковым надрезом применяли для испытаний на удар по ISO 179-1/1eA. Испытания проводили на маятниковом копре PIT550J (Shenzhen Wance Testing Machine Co. Ltd., КНР).

Т а б л и ц а 1. Составы исследованных материалов и технология их компаундирования
T a b l e 1. Compositions of the studied materials and their technology of compounding

Состав	Технология компаундирования, используемые компоненты и их концентрации
<i>I. Одностадийное компаундирование (без добавки Cl30B)</i>	
1.1.	ПА6
1.2.	ПА6/фПО – 10 %
1.3.	ПА6/фПО – 30 %
1.4.	ПА6/фПО – 50 %
<i>II. Одностадийное компаундирование (одновременное ведение всех компонентов)</i>	
2.1.	(ПА6/фПО – 10 %/Cl30B – 3,0 %)
2.2.	(ПА6/фПО – 30 %/Cl30B – 3,0 %)
2.3.	(ПА6/фПО – 50 %/Cl30B – 3,0 %)
<i>III. Двухстадийное компаундирование (на первой стадии получали концентрат Cl30B в фПО, на второй вводили все компоненты)</i>	
3.1.	ПА6/(фПО – 10 %/Cl30B – 3,0 %)
3.2.	ПА6/(фПО – 30 %/Cl30B – 3,0 %)
3.3.	ПА6/(фПО – 50 %/Cl30B – 3,0 %)

П р и м е ч а н и е. В табл. 2–5 обозначения составов приняты в соответствии с табл. 1.

Т а б л и ц а 2. Показатели реологических и механических свойств исследованных материалов

Table 2. Characteristics of rheological and mechanical properties of the investigated materials

Состав	ПТР, г/10 мин	σ_t , МПа	σ_p , МПа	ε_p , %
1.1	13,51	49,0	61,0	280,0
1.2	6,96	59,4	43,5	167,5
1.3	1,94	43,0	49,3	215,3
1.4	0,23	27,7	36,8	272,5
2.1	3,58	64,8	47,4	34,6
2.2	0,55	47,0	46,2	198,7
2.3	0,14	28,8	29,0	58,0
3.1	4,10	68,0	47,0	55,4
3.2	0,2	50,0	51,0	234,0
3.3	0,07	29,4	33,4	214,0

Примечание. σ_t , σ_p , ε_p – соответственно верхний предел текучести, прочность при разрыве, относительное удлинение при разрыве, определенные при испытаниях лопаток методом растяжения.

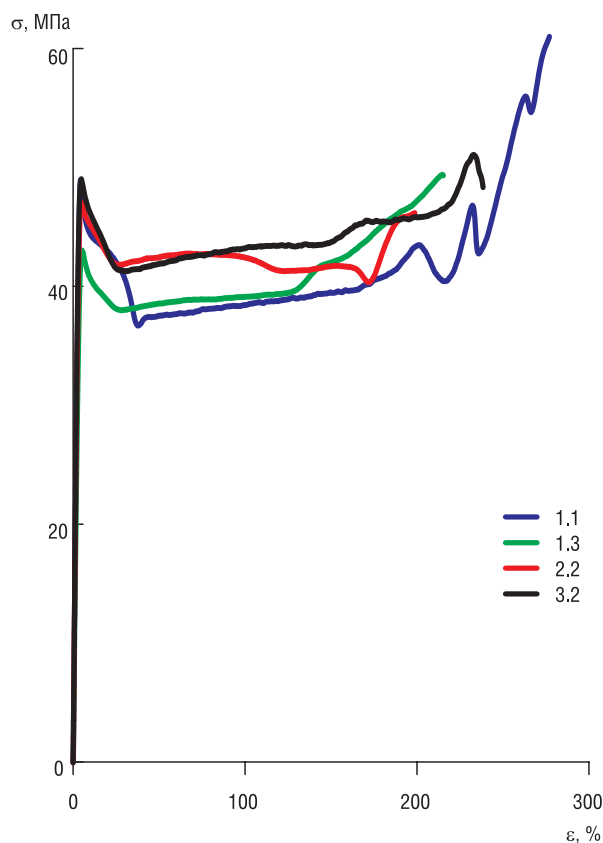


Рис. 1. Деформационные кривые исследуемых материалов (здесь и далее в рисунках обозначения кривых – составы согласно табл. 1)

Fig. 1. The deformation curves of the studied materials (hereinafter in the figures, curve designations – compositions according to table 1)

Рентгеноструктурный анализ (РСА) ПА6 композитов осуществляли на дифрактометре RDA-2000 (GNR Analytic Instruments, Италия) в интервале углов $10\text{--}30^\circ$ (для анализа структуры ПА6 и фПО) при использовании $\text{CuK}\alpha$ -излучения ($\lambda = 0,154$ нм); шаг сканирования $0,05^\circ$; время на точку 0,5 с; напряжение 40 кВ; ток 30 мА.

Для проведения термического анализа использовали синхронный термоанализатор STA 449 F3 Jupiter (NETZSCH-Gerätebau GmbH, Германия), совмещенный с ИК-Фурье спектрометром (BRUKER Optics, США). Термограммы снимали в токе азота при скорости нагрева $4^\circ\text{C}/\text{мин}$.

Результаты и обсуждение. В табл. 2 представлены данные о реологических характеристиках и механических свойствах исследуемых материалов, определенных при испытаниях лопаток методом растяжения. Уровень значений приведенных показателей свойств зависит от состава материалов и технологии их получения.

Следует отметить, что добавка Si30B в ПА6/фПО смеси снижает значения ПТР. Причем в случае двухстадийного компаундирования значения ПТР снижаются в большей степени, чем при одностадийном способе получения нанокompозитов. Одной из причин этого может быть интенсификация межфазных взаимодействий как между полимерными компонентами, так и нанонаполнителя с полимерными матрицами вследствие адсорбции макромолекул на наночастицах [7]. Кроме этого, можно предположить, что рост вязкости при двухстадийном компаундировании может быть связан с более активным протеканием процессов эксфолиации и интеркаляции, в результате чего улучшается степень распределения наночастиц слоистого силиката в объеме ПА6/фПО. Как известно [1, 8], уровень межфазных взаимодействий определяет свойства смесевых и наполненных композитов.

Согласно данным табл. 2 и рис. 1, компаундирование по двухстадийной технологии, предопределяющей преимущественную локализацию Si30B в фазе фПО, приводит, по сравнению с одностадийным методом, к росту значений предела текучести (σ_t) и прочности при разрыве при равных соотношениях компонентов. Одновременно с этим составы, полученные по двухстадийной технологии,

обладают более высоким уровнем значений относительного удлинения при разрыве (ϵ_p) по сравнению с материалами, приготовленными одностадийным методом. Особенно выражен эффект роста данного показателя для материалов, полученных по двухстадийной технологии при содержании полиолефиновой фазы в диапазоне 30–50 мас.%. Так, для составов 3.2 и 3.3 значения ϵ_p составляют 234 % и 214 % соответственно и приближаются к величине ϵ_p , характерной для исходного ПА6.

Сравнение значений ударной вязкости исследуемых материалов, представленных в табл. 3, показало, что композиты, изготовленные по одностадийной технологии, в которых дисперсионную среду образует ПА6, независимо от типа надреза и способа испытаний обладают более высокой стойкостью к удару.

Лишь при повышении содержания фПО до 50 мас.%, когда в смесях ПА6/фПО происходит инверсия фаз, можно наблюдать более высокие значения ударной вязкости для состава, приготовленного по двухстадийной технологии (см. табл. 3). Видимо, при одностадийной технологии получения нанокомпозитов с преобладанием полиамидной фазы в смесях снижение интенсивности межфазных взаимодействий и степень диспергирования органоглины благоприятно сказывается на образовании и стабилизации менее однородной структурной морфологии смесей, обеспечивающей обычно более эффективное диссипирование энергии при ударном разрушении образцов [8].

Определенный интерес представляет анализ влияния последовательности введения органоглины в объем смесового композита ПА6/фПО на изменения его кристаллической структуры.

Как видно из рис. 2 и табл. 4, дифрактограммы исходного ПА6 характеризуются наличием интенсивного максимума при $2\theta = 21,4^\circ$.

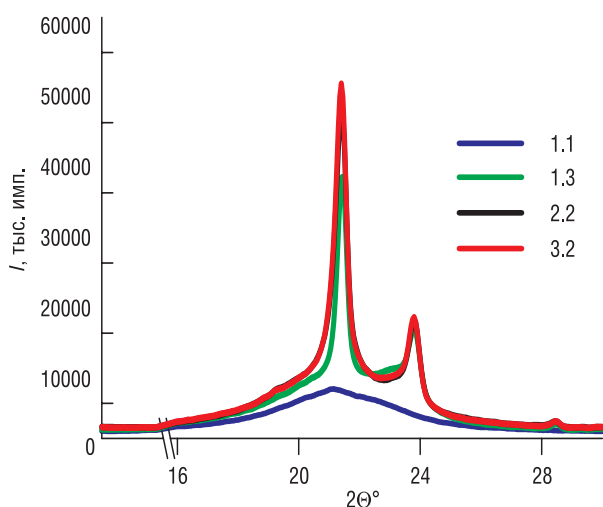


Рис. 2. Дифракционные кривые исходного ПА6 (1.1), а также смесовых композитов 1.3, 2.2 и 3.2

Fig. 2. Diffraction curves of the initial PA6 (1.1), as well as mixed composites 1.3, 2.2, and 3.2

Т а б л и ц а 3. Показатели ударопрочных свойств исследованных материалов

Table 3. Indicators of impact-resistant properties of the investigated materials

Состав	$a_{ш}$, кДж/м ²		a_{ISO} , кДж/м ²	$a_{ш}$, кДж/м ² , при -40 °С
	ОН	ПН		ОН
1.1	9,88	5,7	3,4	5,3
1.2	17,3	18,73	10,6	13,9
1.3	41,6	60,6	86,0	25,4
1.4	45,1	42,2	93,5	33,5
2.1.	12,9	11,03	4,4	8,6
2.2.	21,0	22,3	21,7	13,4
2.3.	39,4	43,0	69,6	8,1
3.1.	12,8	10,85	4,0	6,7
3.2.	17,4	17,9	11,4	12,0
3.3.	40,0	45,5	73,9	9,6

Примечание. $a_{ш}$ – Ударная вязкость по Шарпи, ПН и ОН – соответственно прямоугольный и острый надрезы, a_{ISO} – ударная вязкость по ISO на образцах с боковым надрезом.

Т а б л и ц а 4. Интенсивность дифракционных максимумов на рентгенограммах ПА6 и смесовых композитов

Table 4. Intensity of the diffraction peaks on X-ray curves of PA6 and blend composites

Состав	Интенсивность пика (имп.) при угле дифракции 2θ	
	21,4°	23,8°
1.1.	7061	–
1.2.	14416	(перегиб) 6120,7
1.3.	37286	(перегиб) 15728
1.4.	70298	25097
2.1.	24038	4953
2.2.	47206	16890
2.3.	48868	15734
3.1.	32606	6194
3.2.	50551	17290
3.3.	57632	18597

При введении фПО в ПА6 на рентгенограммах фиксируется два четких узких пика при $2\theta = 21,4^\circ$ и $2\theta = 23,8^\circ$. Причем интенсивность пика $2\theta = 21,4^\circ$, который характеризует γ -формы кристаллической модификации [11], в смесях ПА6/фПО гораздо выше, чем у исходного ПА6. Важно отметить, что в связи с наложением дифракционных пиков при $2\theta = 21,4^\circ$ ПА6 и фПО можно судить лишь о суммарной кристалличности обеих фаз в смесях ПА6/фПО.

Интенсивности обоих пиков при $2\theta = 21,4^\circ$ и $23,8^\circ$ для смесей с равными соотношениями компонентов также сильно зависят от наличия органоглины и способа ее введения в объем ПА6/фПО смеси. Для всех композиций, полученных по двухстадийной технологии, интенсивности обоих пиков при $2\theta = 21,4^\circ$ и $23,8^\circ$ выше, чем для однотипных композитов, приготовленных одностадийным способом.

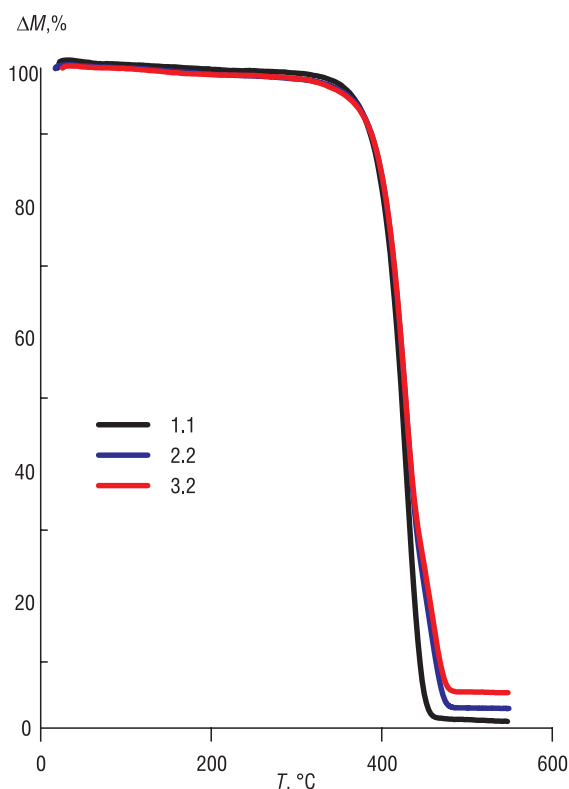


Рис. 3. ТГА кривые ПА6 (1.1) и смесевых композитов 2.2 и 3.2, содержащих органоглину С130В

Fig. 3. TGA curves of PA6 (1.1) and mixed composites 2.2 and 3.2 containing organoclay C130B

Т а б л и ц а 5. Данные дифференциально-термического анализа ПА6 и смесевых композитов, содержащих органоглину С130В

Table 5. Data of differential thermal analysis of PA6 and mixed composites containing organoclay C130B

Состав	$T_{нд}$, °C	$T_5\%$, °C	$T_{10\%}$, °C	$T_{50\%}$, °C	$T_{од}$, °C	ΔM , %
1.1	373,3	369,5	386,6	423,0	457,0	99,72
2.2	383,5	367,0	383,5	427,8	473,3	97,00
3.2	379,1	365,1	387,8	428,0	478,0	94,97

П р и м е ч а н и е. $T_{нд}$, $T_5\%$, $T_{10\%}$, $T_{50\%}$, $T_{од}$ – соответственно температура начала деструкции, потери 5%, 10%, 50% массы и окончания деструкции, ΔM – потеря массы

Видимо, добавка С130В из концентрата при двухстадийном компаундировании повышает кристалличность как полиамидной, так и полиолефиновой фазы в смесях. Интересно, что во всех композитах, в которых присутствует органоглина и ПА6 образует дисперсную среду (содержание фПО ≤ 30 мас.%), величины пиков при $2\theta = 21,4^\circ$ и $23,8^\circ$ выше, чем для исходных ПА6/фПО смесей. Повышение содержания фПО до 50 мас.% приводит к снижению интенсивности дифракционных пиков при $2\theta = 21,4^\circ$ и $23,8^\circ$ в нанокompозитах по сравнению со смесью ПА6/фПО аналогичного состава, но не содержащую органоглину. Это может происходить вследствие более высокой вязкости расплава, характерной для составов 2.3, 3.3, чем для состава 1.3, интенсификации межфазных взаимодействий и кинетических затруднений при последующей кристаллизации [9].

Таким образом, рентгеноструктурный анализ подтверждает тот факт, что структура и комплекс технических характеристик ПА6/фПО композиций, в которых присутствует органоглина С130В, зависит от способа компаундирования.

На рис. 3 и в табл. 5 представлены данные дифференциально-термического анализа исходного ПА6 и ПА6/фПО композиций, содержащих органоглину С130В. Сопоставление кривых термогравиметрического анализа показало, что добавки С130В увеличивают термостабильность ПА6/фПО смеси по сравнению с исходным ПА6.

В отличие от ПА6 нанокompозиты деформируются с образованием коксового остатка. Причиной этого может быть то, что органоглина сама по себе обладает повышенной термостойкостью и способна создавать теплоизоляционный эффект [5].

Заклучение. Проведенные исследования показали, что одним из факторов, влияющих на структуру и свойства накомпозитов на основе ПА6/фПО смеси, является способ их получения. Введение органоглины С130В в состав ПА6/фПО смеси по двухстадийной технологии, базирующейся на использовании концентрата С130В в фПО, дает возможность получать накомпозиты с улучшенным сочетанием деформационно-прочностных свойств по сравнению с накомпозитами, приготовленными по одностадийной технологии. В то же время накомпозиты, полученные по одностадийной технологии, в которых дисперсионную среду образует ПА6, независимо от типа надреза и способа испытаний обладают более высокой стойкостью к удару, чем материалы, приготовленные двухстадийным способом. Это объясняется различиями в степени диспергирования нанонаполнителя и уровне межфазных взаимодействий между полимерными компонентами и наночастицами, вследствие чего изменяются кристалличность компонентов в смесях, а также комплекс их реологических и механических характеристик. Показано, что добавки органоглины С130В, независимо от способа ее введения, увеличивают термостабильность ПА6/фПО смесей по сравнению с исходным ПА6. Полученные результаты необходимо учитывать при реализации реальных технологий компаундирования при производстве накомпозитов.

Список использованных источников

1. Utracki, L. A. History of commercial polymer alloys and blends (from a perspective of the patent literature) / L. A. Utracki // *Polym. Eng. Sci.* – 1995. – Vol. 35, № 1. – P. 2–17. <https://doi.org/10.1002/pen.760350103>
2. Песецкий, С.С. Смесевые полиамидные композиции и технологии их получения (обзор) / С.С. Песецкий, А.А. Богославский // *Материалы. Технологии. Инструменты.* – 1999. – № 2. – С. 27–38.
3. Jurkowski, B. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology, and high elastic properties of melts / B. Jurkowski, S. S. Pesetskii // *Polyolefin Blends* / ed. D. Nwabunma and T. Kyu. – Wiley and Sons Inc. Hoboken, New Jersey, 2008. – Ch.18. – P. 527–555. <https://doi.org/10.1002/9780470199008.ch18>
4. Pesetskii, S. S. Polymer/Clay Nanocomposites Produced by Dispersing Layered Silicates in Thermoplastic Melts / S. S. Pesetskii, S. P. Bogdanovich, V. N. Aderikha // *Polymer Nanocomposites for Advanced Engineering and Military Applications* / ed. N. Ramdani. – IGI Global, USA, 2019. – Ch. 3. – P. 66–94. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7838-3.ch003>
5. Песецкий, С.С. Нанокompозиты, получаемые диспергированием слоистых силикатов в расплавах полимеров (обзор) / С.С. Песецкий, С.П. Богданович, Н.К. Мышкин // *Полимер. материалы и технологии.* – 2015. – Т. 1, № 1. – С. 7–37.
6. Песецкий, С.С. Смеси алифатических полиамидов с функционализированными полиолефинами: межфазные взаимодействия, особенности реологического поведения расплавов, структуры и механических свойств / С.С. Песецкий, Ю.М. Кривогуз // *Докл. Нац. акад. наук Беларуси.* – 2018. – Т. 62, №4. – С. 480–487. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-480-487>
7. White, J.L. Rheological behavior of molten polymer blends and particle-filled melts / J.L. White // *Polymer Compatibility and Incompatibility: Principles and Practices* / ed. K. Sols. – New York: Harwood Academic Publishers, 1982. – 464 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9213-0>
8. Полимерные смеси / под ред. Д. Пола, С. Ньюмена. – М.: Мир, 1981. – Т. 2. – 461 с.
9. Fornes, T.D. Crystallization behavior of nylon 6 nanocomposites / T.D. Fornes, D.R. Paul // *Polymer.* – 2003. – Vol. 44. – P. 3945–3961. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00344-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00344-6)

References

1. Utracki L. A. History of Commercial Polymer Alloys and Blends (From Perspective of the Patent Literature). *Polymer Engineering & Science*, 1995, vol. 35, no. 1, pp. 2–17. <https://doi.org/10.1002/pen.760350103>
2. Pesetskiy S. S., Bogoslavskiy A. A. Blended polyamide compositions and technologies for their production (review). *Materialy. Tekhnologii. Instrumenty* [Materials. Technologies. Tools], 1999, no. 2, pp. 27–38 (in Russian).
3. Jurkowski B., Pesetskii S.S. Functionalized polyolefins and aliphatic polyamide blends: interphase interactions, rheology, and high elastic properties of melts. Nwabunma D., Kyu T. (eds.). *Polyolefin Blends*. New Jersey, Wiley and Sons Inc. Hoboken, 2008, ch.18, pp. 527–555. <https://doi.org/10.1002/9780470199008.ch18>
4. Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Aderikha V. N. Polymer/Clay Nanocomposites Produced by Dispersing Layered Silicates in Thermo-Plastic Melts. Ramdani N. (ed.). *Polymer Nanocomposites for Advanced Engineering and Military Applications*. IGI Global, USA, 2019, ch. 3, pp. 66–94. <https://doi.org/10.4018/978-1-5225-7838-3.ch003>
5. Pesetskii S. S., Bogdanovich S. P., Myshkin N. K. Nanocomposites prepared by dispersing layered silicates in polymer melt (review). *Polimernye materialy i tehnologii* [Polymeric Materials and Technology], 2015, vol. 1, no. 1, pp. 7–37 (in Russian).
6. Pesetskii S. S., Krivoguz Yu. M. Blends of aliphatic polyamides with functionalized polyolefins: interphase interactions, features of the rheological behavior of melts, structure and mechanical properties. *Doklady Natsional'noi akademii*

nauk Belarusi = *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2018, vol. 62, no. 4, pp. 480–487 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-4-480-487>

7. White J. L. Rheological behavior of molten polymer blends and particle-filled melts. Sols K. (ed.) *Polymer Compatibility and Incompatibility: Principles and Practices*. Harword Academic Publishers. New York, 1982, pp. 413–441.

8. Paul D., Newman S. *Polymer blends. Vol. 2*. NY, Academic Press, 1978. 454 p.

9. Fornes T. D., Paul D. R. Crystallization behavior of nylon 6 nanocomposites. *Polymer*, 2003, vol. 44, pp. 3945–3961. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(03\)00344-6](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(03)00344-6)

Информация об авторах

Песецкий Степан Степанович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий отделом, Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: otdel5mpri@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-6540-9526>

Кривогуз Юрий Михайлович – кандидат технических наук, доцент, заведующий сектором, Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: yurikriv@tut.by. <https://orcid.org/0000-0002-1182-6938>

Богданович Сергей Павлович – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого Национальной академии наук Беларуси (ул. Кирова, 32а, 246050, Гомель, Республика Беларусь). E-mail: sergiy@bk.ru

Information about the authors

Stepan S. Pesetskii – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of the Department, V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: otdel5mpri@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-6540-9526>

Yuri M. Krivoguz – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Head of the Sector, V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: yurikriv@tut.by. <https://orcid.org/0000-0002-1182-6938>

Sergei P. Bogdanovich – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of National Academy of Sciences of Belarus (32a, Kirov Str., 246050, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: sergiy@bk.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА
MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS

УДК 629.353
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-185-196>

Поступила в редакцию 31.07.2019
Received 31.07.2019

**П. А. Пархомчик¹, П. А. Витязь^{2,3}, А. Н. Егоров¹, В. И. Моисеенко³, А. М. Насковец¹,
Д. И. Харитончик^{3,4}, С. А. Шишко¹**

¹ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», Жодино, Минская область,
Республика Беларусь

²Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

³Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь

⁴Министерство промышленности Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь

**НОВАЦИИ В СОЗДАНИИ И ОБЕСПЕЧЕНИИ КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТИ
КАРЬЕРНОЙ ТЕХНИКИ БЕЛАЗ**

Аннотация. Определены задачи развития ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ», которые заключаются в использовании и внедрении в процессы проектирования и производства карьерной техники последних достижений в области технических наук и созданных на их основе инновационных технологий; освоении новой конкурентоспособной продукции и перспективных рынков сбыта, диверсификации экспорта. Совместно с научными организациями выполнены исследования, которые позволили разработать новые и усовершенствовать существующие методические подходы к решению актуальных задач по всем проблемным направлениям создания современных карьерных самосвалов особо и сверх особо большой грузоподъемности. ОАО «БЕЛАЗ» является единственным производителем и поставщиком самосвалов грузоподъемностью 450–500 т. В результате исследований по созданию таких машин впервые рекомендована модель короткобазового маневренного самосвала с жесткой рамой специальной конструкции, снижающей центр тяжести и погрузочную высоту карьерного самосвала, исполненного по схеме 4×4 (два ведущих моста) с двойной ошиновкой осей и применением существующих шин с максимальной грузоподъемностью 104 т. Предложенные и всесторонне опробованные новые компоновочные решения дают основание считать, что при освоении производства шин грузоподъемностью более 110 т реальностью является разработка самосвалов грузоподъемностью до 600 т. Также создано новое поколение самосвалов с гидромеханическими трансмиссиями, ведутся работы по созданию роботизированных комплексов для горнодобывающей промышленности. Особое внимание уделяется компьютеризации, цифровизации и экологичности карьерной техники, обеспечению надежности техники путем создания и применения новых конструкционных материалов и технологий для крупногабаритных деталей и систем.

Ключевые слова: машиностроение, карьерный самосвал, тенденции развития, карьер, грузоподъемность, несущие конструкции, зубчатые колеса, конструкционная сталь

Для цитирования: Новации в создании и обеспечении конкурентоспособности карьерной техники БЕЛАЗ / П. А. Пархомчик [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 185–196. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-185-196>

**Pyotr A. Parkhomchik¹, Pyotr A. Vityaz^{2,3}, Alexander N. Egorov¹, Vladimir I. Moiseenko³, Alexander M. Naskovets¹,
Dmitry I. Haritonchik^{3,4}, Sergey A. Shishko¹**

¹OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus

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

³Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

⁴Ministry of Industry the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

NOVATIONS IN CREATION AND ENSURING THE COMPETITIVENESS OF BELAZ QUARRY MACHINERY

Abstract. The development tasks of OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING”, are defined, which consist in using and introducing the latest achievements in the field of technical sciences and innovative technologies created on their basis into the design and production processes of mining equipment; development of new competitive products

and promising sales markets, diversification of exports. Together with scientific organizations, studies have been carried out that have allowed us to develop new and improve existing methodological approaches to solving urgent problems in all problematic areas of creating modern mining dump trucks especially and in excess of extra heavy lifting capacity. OJSC “BELAZ” is the only manufacturer and supplier of dump trucks with a carrying capacity of 450–500 tons. As a result of research on the creation of such machines, the model of a short-base maneuverable dump truck with a rigid frame of a special design was first recommended, which reduces the center of gravity and loading height of a mining dump truck, designed according to the 4×4 scheme (two drive axles) with double axle busbar and the use of existing tires with a maximum carrying capacity of 104 tons. The proposed and comprehensively tested new layout solutions give reason to believe that the development of dump trucks with a carrying capacity of up to 600 tons is a reality when mastering the production of tires with a carrying capacity of more than 110 tons. A new generation of dump trucks with hydromechanical transmissions is designed; work is underway to create robotic complexes for the mining industry. Particular attention is paid to computerization, digitalization and environmental friendliness of mining equipment, ensuring the reliability of technology by creating and applying new structural materials and technologies for large parts and systems.

Keywords: engineering, mining dump truck, development trends, quarry, carrying capacity, load-bearing structures, gears, structural steel

For citation: Parkhomchik P. A., Vityaz P. A., Egorov A. N., Moiseenko V. I., Naskovets A. M., Haritonchik D. I., Shishko S. A. Novations in creation and ensuring the competitiveness of BELAZ quarry machinery. *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. 2, pp. 185–196 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-185-196>

Введение. В современном мире разработка минеральных сырьевых ресурсов является одним из важнейших направлений, обеспечивающих прогресс ряда базовых отраслей экономики, в том числе и наукоемких. Развитые страны (США, Англия, Германия, Франция, Япония), на долю которых приходится 16 % населения Земли, потребляют более половины извлекаемых полезных ископаемых [1–8]. Наиболее распространена сегодня разработка месторождений в открытых карьерах. В них извлекается более 80 % всех мировых запасов природных ископаемых. При этом в качестве основного вида транспорта в карьерах и шахтах используется автомобильный, который обеспечивает от 75 до 100 % грузовых перевозок [2, 3].

Сегодня ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» является единственным в мире предприятием, осуществляющим сборку карьерных самосвалов на двух конвейерах и постовую сборку самосвалов 90, 360 и 450 т в новом цехе производства сверхтяжелых машин (рис. 1).



Рис. 1. Линии сборки самосвалов БЕЛАЗ: *a* – сборка самосвалов грузоподъемностью 30–55 т; *b* – сборка самосвалов грузоподъемностью 130–240 т; *c, d* – сборка самосвалов грузоподъемностью 90, 360 и 450 т

Fig. 1. Assembly lines of dump trucks BELAZ: *a* – assembly of dump trucks with load capacity 30–55 t; *b* – assembly of dump trucks with load capacity 130–240 t; *c, d* – assembly of dump trucks with load capacity 90, 360 and 450 t

За 70-летнюю історыю существования предприятия его техника отгружалась в 76 стран. Ежегодно продукция завода поставляется в более чем 30 стран мира. Общий парк работающих карьерных самосвалов БЕЛАЗ грузоподъемностью 30–360 т только на предприятиях России сегодня насчитывает более 10 000 единиц.

В течение последних 10 лет приоритетными экспортными рынками для белорусского предприятия являются Россия, Украина, Казахстан, Узбекистан. Появились также и новые рынки сбыта: Азербайджан, Ангола, Венесуэла, Зимбабве, Индонезия, Марокко, Сербия, Филиппины, Бангладеш.

Несмотря на то, что в последние годы вследствие обострения конкуренции к карьерным самосвалам выдвигаются повышенные требования, по результатам 2018 и 2019 гг. БЕЛАЗ уверенно удерживает 3-е место, обеспечивая долю в объемах продаж на мировых рынках в пределах 20–25 %, что является рекордным показателем для экспортеров Беларуси [9].

Перспектива развития холдинга до 2030 г. определяется поэтапным решением следующих задач: использование и внедрение в процессы проектирования и производства карьерной техники последних достижений в области технических наук и созданных на их основе инновационных технологий; освоение новой конкурентоспособной продукции и перспективных рынков сбыта, диверсификация экспорта.

Важнейшая роль в решении указанных задач отводится Научно-техническому центру ОАО «БЕЛАЗ», который создан в структуре Управления главного конструктора и осуществляет свою деятельность в тесном сотрудничестве с научно-техническим центром двойного подчинения НАН Беларуси – ОАО «БЕЛАЗ», организованным в 2007 г. Среди научных учреждений НАН Беларуси, сотрудничающих с холдингом, следует отметить деятельность Объединенного института машиностроения (ОИМ), Института порошковой металлургии имени академика О. В. Романа (ИПИМ), Физико-технического института. В инновационной деятельности предприятия активно участвуют учебные заведения Беларуси и ученые России.

Сегодня при создании и совершенствовании карьерной техники в Беларуси широко используются высокопроизводительные компьютеры с набором современных проектно-конструкторских и расчетных программ. Они позволяют осуществлять компоновочный и прочностной анализ будущей машины, ее систем, узлов и отдельных элементов. В комплексе с собственными отлаженными методиками расчета и конструирования сформированы возможности уже с первых опытных образцов создавать работоспособную и высокоэффективную технику. Кроме того, прежде чем отправиться к заказчику, новая техника проходит установленный цикл испытаний на стендах экспериментального цеха и трассах заводского испытательного полигона [10].

Созданные научно-технические структуры и активное взаимодействие специалистов завода и представителей науки позволили реализовать наукоемкую систему оптимизации конструкций самосвалов и внедрить передовые технологии создания конкурентоспособной продукции путем не только привлечения последних достижений фундаментальной науки, но и подготовки кадров высшей квалификации из числа непосредственно занятых в создании современной техники работников предприятия – носителей «знаний технологий».

Параметрический ряд и типаж карьерных самосвалов. Успех на современных рынках горнотранспортной техники определяется техническим уровнем (прежде всего грузоподъемностью и производительностью), степенью готовности (надежностью) парка машин, а также расходами на их обслуживание (особенно на шины и топливо). При этом заполнение рынка востребованными моделями самосвалов с обязательным исполнением фактора «цена–качество» остается доминирующим направлением.

Современные карьеры отличаются значительной глубиной по причине снижения объема вскрышных работ. Фактическая глубина карьеров достигла 500–600 м, но уже в наши дни функционирует карьер глубиной 1000 м [5]. При этом уклоны дорог увеличиваются от нормативных значений порой в 1,5–2 раза, а ширина проезжей части и радиусы поворотов дорог практически остаются неизменными. Все это накладывает особые требования как к общей компоновке самосвалов в части их безопасности и скорости движения, так и к обеспечению надежности деталей и узлов силовой передачи в условиях длительного воздействия повышенных нагрузок. Особую актуальность решение этих задач приобретает для самосвалов особо большой грузоподъемности до 400–500 т.

Сформированная на предприятии инженерная и научная база позволяет управлять конкурентоспособностью продукции на всех этапах ее создания: от научного формирования параметрического ряда современных карьерных самосвалов и их типажа [11] до оценки перспектив реализации на рынке новых моделей карьерных самосвалов. Современный ряд выпускаемой холдингом (вместе с филиалами) техники насчитывает более 20 моделей карьерной и специализированной техники, конкурентных на всех рынках.

За последние годы предприятие, опираясь на собственные инновационные разработки и сотрудничество с рядом научных организаций, создало и поставило на производство целый ряд образцов новой конкурентоспособной карьерной техники: как самосвалов с электромеханической трансмиссией (ЭМТ) грузоподъемностью от 90 т и самого большого в мире карьерного самосвала грузоподъемностью 450 т, так и карьерных самосвалов грузоподъемностью 55, 90 и 135 т (опытный образец) с полностью новыми гидромеханическими трансмиссиями (ГМТ) собственной разработки, состоящими из автоматических планетарных коробок передач (ПКП) и ведущих мостов повышенной надежности и ресурса (рис. 2).



Рис. 2. Карьерные самосвалы БЕЛАЗ-75710 грузоподъемностью 450 т (а) и БЕЛАЗ-7555Н грузоподъемностью 55 т (б)
 Fig. 2. Mining trucks BELAZ-75710 with load capacity 450 t (a), and BELAZ-7555H with load capacity 55 t (b)

Особые перспективы продаж существуют для самосвалов грузоподъемностью 450–500 т, единственным производителем и поставщиком которых является ОАО «БЕЛАЗ». Создание такой машины потребовало создания новых специальных знаний и конструкторских решений как в области общей компоновки самосвала и обеспечения ресурса крупногабаритных деталей, так и в части обеспечения его маневренности, продольной и поперечной устойчивости из-за резкого увеличения центра тяжести машин такого типа, так как другие габаритные размеры (длина, ширина) нового карьерного самосвала сопоставимы с габаритными размерами машин класса грузоподъемности 320–360 т.

На рынке самосвалов грузоподъемностью 90–150 т (на примерах эксплуатации в ряде карьеров Российской Федерации) отмечается конкуренция за счет использования в их конструкциях ГМТ. Самосвалы с ГМТ по-прежнему создают конкуренцию машинам с ЭМТ при одинаковых характеристиках двигателей и удельной металлоемкости. Кроме того, стоимость самосвала с ГМТ (особенно с трансмиссией собственного изготовления) может быть ниже, чем самосвала с ЭМТ. Успешное создание самосвалов нового для холдинга типа (в первую очередь агрегатов их ГМТ) потребовало специальных знаний при конструировании агрегатов и разработки технологий их получения. В решении этих задач значительный вклад внесен учеными Беларуси.

Новации и основы создания карьерных самосвалов особо большой и сверх особо большой грузоподъемности. Выполненные совместно с научными организациями исследования позволили разработать новые и усовершенствовать существующие методические подходы к решению актуальных задач по всем проблемным направлениям создания современных карьерных самосвалов особо и сверх особо большой грузоподъемности. Эти работы направлены прежде

всего на рациональный выбор удельной мощности двигательной установки, конструктивное исполнение силовой передачи, обеспечение минимального расхода топлива, эффективных систем тормозов, рулевого управления и подвески, гарантированной поперечной устойчивости самосвала в глубоких карьерах, оптимальной нагруженности шин (с целью достижения необходимого ресурса и исключения интенсивного их износа в условиях буксования и заноса), обеспечение прочности деталей трансмиссии и несущих систем.

В результате исследований по созданию уникальной техники (самосвалов грузоподъемностью 450–500 т) впервые рекомендована модель короткобазового маневренного самосвала с жесткой рамой специальной конструкции, снижающей центр тяжести и погрузочную высоту карьерного самосвала, исполненного по схеме 4×4 (два ведущих моста) с двойной ошиновкой осей и применением существующих шин с максимальной грузоподъемностью 104 т. Предложенные и всесторонне опробованные новые компоновочные решения дают основание считать, что при освоении производства шин грузоподъемностью более 110 т реальностью является создание самосвалов грузоподъемностью до 600 т [10].

Установка сдвоенных шин на передней оси значительно улучшает технико-эксплуатационные показатели нового автомобиля. Так, удельная грузоподъемность двухосного самосвала увеличивается в 1,4–1,5 раза в сравнении с традиционной компоновочной схемой 4×2 . Два ведущих моста со специально созданной ЭМТ для самосвала грузоподъемностью свыше 450 т позволяют увеличить тягу на колесах, а также преодолевать повышенные уклоны на внутрикарьерных дорогах. Маневренность самосвала при электрогидравлической схеме рулевого управления и двух поворотных мостах сопоставима с «классическими» карьерными самосвалами грузоподъемностью 360 т, что позволяет беспрепятственно эксплуатировать самосвал на «узких» дорогах глубоких карьеров.

Впервые наряду с выработанными решениями по оптимизации параметров маневренности карьерных самосвалов разработаны, реализованы и всесторонне проверены в стендовых и эксплуатационных условиях принципиально новые для карьерной техники расчетные и конструкционные решения по проблеме обеспечения поперечной устойчивости короткобазового карьерного самосвала особо большой грузоподъемности [11, 12].

Расчеты оптимизации поперечной устойчивости выполнены специалистами завода методом динамического моделирования условий движения. При этом использована уникальная расчетная многомассовая модель самосвала, состоящая из 25 абсолютно жестких тел, связанных между собой шарнирами в соответствии с кинематикой подвески и рулевого управления и силовыми элементами с учетом упругих характеристик шин, цилиндров подвески и контактного взаимодействия рамы с платформой. Модель является полностью параметрической и позволяет проводить анализ с учетом чувствительности модели к изменению параметров.

Принцип работы стабилизаторов поперечной устойчивости основан на гашении энергии бокового крена специальными упругими элементами при их деформации. Принципиально важными результатами являются и конструкционные решения по упругим элементам, обеспечивающим их ресурс, равный жизненному циклу самосвала.

Двойная ошиновка обеих осей не только повышает грузоподъемность, но и изменяет развеску по осям в соотношении 50 % на 50 %, что позволяет увеличить ходимость шин за счет более оптимального перераспределения общей массы самосвала при работе на повышенных уклонах.

Новые принципы создания самосвалов повышенной грузоподъемности (450–500 т) подтверждены стендовыми и полигонными испытаниями, а также результатами эксплуатации в карьерах Кузбасса. Как и предусматривалось проектным расчетом, реальная производительность нового самосвала в 2–2,5 раза превышает производительность любого из самосвалов существующего парка, что открывает перспективы нового изделия на мировом рынке карьерной техники.

Новое поколение самосвалов с гидромеханическими трансмиссиями. Разработаны и освоены в производстве карьерные самосвалы грузоподъемностью 55, 90 и 135 т (опытный образец), снабженные новыми ГМТ собственной разработки и предназначенные для работы в глубоких карьерах. В состав ГМТ входят автоматические ПКП, позволяющие переключать передачи под нагрузкой, и новые ведущие мосты повышенного ресурса. Созданная на заводе с использованием научных разработок новая методология выбора и оптимизации кинематических

параметров трансмиссии позволила начать собственное производство конкурентоспособных по тягово-динамическому и ценовому факторам самосвалов с ГМТ грузоподъемностью свыше 90 т. Мехатронная система управления автоматической КПП разработана совместными усилиями холдинга и Российско-Белорусского университета. Характеристики самосвала 90 т, укомплектованного агрегатами производства БЕЛАЗ, выгодно отличаются от прототипа, снабженного ПКП известного зарубежного производителя. Испытаниями на заводском полигоне установлено, что при преодолении подъема с уклоном 8 % без предварительного разгона средняя скорость самосвала с ГМТ производства БЕЛАЗ выше на 2,4 км/ч (на 28,6 %), а время преодоления подъема меньше на 30,1 % (рис. 3) [13].

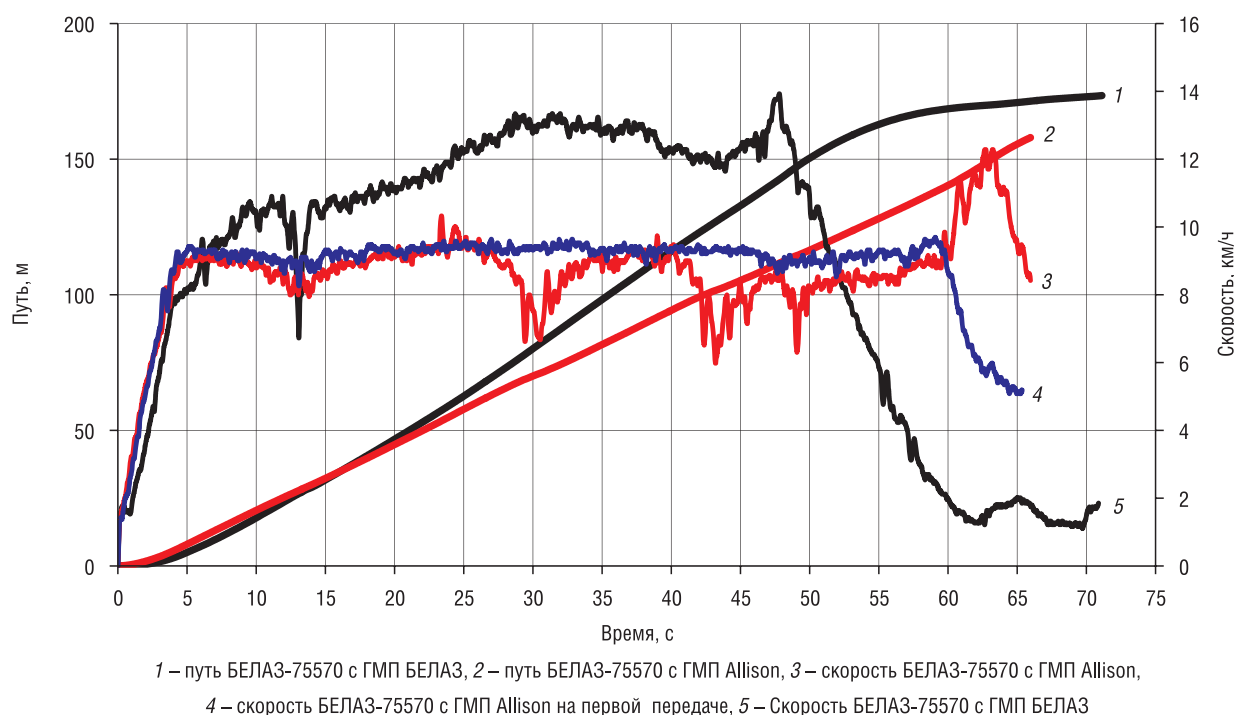


Рис. 3. Сравнительная диаграмма движения БЕЛАЗ-75570 с ГМП производства БЕЛАЗ и ГМП производства Allison на подъем 8 % без предварительного разгона

Fig. 3. Comparative chart of the movement of the BELAZ-75570 with the GMP "BELAZ" and the GMP "Allison" to a rise of 8 % without prior acceleration

Роботизация, экологичность и электронизация карьерных самосвалов. При активном участии российских и белорусских специалистов в холдинге активно ведутся работы по созданию роботизированных комплексов для горнодобывающей промышленности (например, беспилотный самосвал в комплекте с погрузчиком). В настоящее время создается участок интеллектуального карьера на одном из горнодобывающих предприятий на территории Российской Федерации.

Сегодня во многих странах мира ужесточаются экологические стандарты по выбросам отработавших газов. Для обеспечения новых требований на ОАО «БЕЛАЗ» ведутся работы по внедрению в карьерную технику двигателей с нормами ЕРА Tier 4F. Такие модели карьерных самосвалов, как БЕЛАЗ-7555F грузоподъемностью 55 т, БЕЛАЗ-75 581 грузоподъемностью 90 т, БЕЛАЗ-75 135 грузоподъемностью 110 т, БЕЛАЗ-75 310 грузоподъемностью 240 т, БЕЛАЗ-75 320 грузоподъемностью 290 т, соответствуют нормам ЕРА Tier 2, а карьерные самосвалы БЕЛАЗ-75 454 и БЕЛАЗ-75 321 – ЕРА Tier 4F. В ближайшее время в линейке выпуска карьерных самосвалов появятся карьерные самосвалы с дизельными двигателями, соответствующими стандарту ЕРА Tier 4F в классе грузоподъемности 55, 90, 130, 180, 240 т. В рамках развития названных направлений холдинг на данный момент предлагает горной промышленности карьерные самосвалы, использующие в качестве топлива природный газ.

Еще одним направлением по сокращению выбросов вредных веществ в атмосферу и повышению экономичности является создание карьерного транспорта в дизель-троллейвозном,

троллейвозном и электровозном исполнении (на базе карьерных самосвалов с электромеханической трансмиссией). Сдерживающими массовое производство данного типа транспорта факторами являются дороговизна и малый срок службы накопителей энергии, однако это временно, так как данные аспекты связаны напрямую с потребностью, то есть отсутствием серийного выпуска аккумуляторов необходимой мощности.

Бурное развитие электроники нашло отражение и в создании самосвалов с маркой «БЕЛАЗ». В их констукциях успешно используются современные электронные системы для реализации различного функционала. Сегодня на карьерных самосвалах «БЕЛАЗ» внедрены следующие системы: сигнализации приближения к высоковольтной линии, контроля загрузки и топлива, контроля телеметрическая для измерения давления в шинах, видеообзора, быстрой заправки топливом, многофункциональной диагностики, предупреждения столкновений и контроля слепых зон, удаленного мониторинга карьерного самосвала, обеспечивается интеграция систем самосвала с системами диспетчеризации карьеров [10].

Обеспечение надежности и долговечности несущих систем, крупногабаритных агрегатов и деталей. Для всех моделей самосвалов постоянным остается требование обеспечения надежности и повышения ресурса систем, их агрегатов и деталей. Это касается прежде всего крупногабаритных дорогостоящих деталей из-за больших затрат при их замене, особенно в условиях отдаленной эксплуатации и экстремальных климатических температур. Работоспособность базовых комплектующих, таких как двигатели, шины, генераторы и электродвигатели, достигается кооперацией и поставками от известных производителей. Собственное производство базовых несущих и силовых агрегатов активно использует инновационные материалы и технологии, созданные на основе разработок ведущих научных организаций Национальной академии наук Беларуси и белорусских вузов.

Например, фрикционные диски гидромеханических передач самосвалов «БЕЛАЗ» воспринимают значительные статические и динамические нагрузки, подвергаются воздействию повышенной тепловой нагрузки и интенсивному изнашиванию. Важной задачей при повышении ресурса фрикционов и надежности ГМП является снижение динамической и тепловой нагруженности, возникающих при переключении ступеней. Особые требования к фрикционным дискам предъявляются в ГМП с автоматическим переключением передач без разрыва потока мощности. Для решения указанной задачи совместно с ИПМ ведутся работы по созданию фрикционных материалов с улучшенными триботехническими характеристиками.

Особо следует отметить используемые на предприятии совместные с ОИМ НАН Беларуси решения, направленные на обеспечение заданного ресурса несущих систем карьерного самосвала – рамы и балок передних осей, а также крупногабаритных зубчатых колес редукторов трансмиссий.

Базовым фактором в решении указанных проблем явилась созданная в ОИМ НАН Беларуси и реализованная в производстве методология повышения служебных свойств стали, которая основана на управлении химической, структурной и прочностной однородностью приграничных объемов ее зерен [14]. В результате совместных исследований создан ряд новых конструкционных сталей и технологий получения деталей из них. В производстве карьерных самосвалов БЕЛАЗ особо эффективными являются: сталь 15НМФЛ – для высоконагруженных отливок, сталь 20ХНЗМА – для цементированных крупногабаритных зубчатых колес, сталь 40ХМФА – для азотированных зубчатых колес большого диаметра. Указанные стали и технологии запатентованы (патент 13 742 Респ. Беларусь, МПК С 22С 38/44 «Литейная сталь», авторы – В. И. Моисеенко, П. Л. Мариев, П. И. Папковский, Н. Д. Шкатуло, В. М. Гацуро, В. С. Кураш; патент 16 513 Респ. Беларусь, МПК С 22С 38/46 «Конструкционная легированная сталь», авторы – В. И. Моисеенко, Н. Д. Шкатуло; патент 2 553 764 Российской Федерации: МПК С 22С 38/24 «Азотируемая сталь для зубчатых колес», авторы – В. И. Моисеенко, А. Л. Сапунов, Н. Д. Шкатуло). Производство этих материалов, заготовок и деталей из них для машиностроения освоено в промышленных масштабах на предприятиях Беларуси, России, Украины и Евросоюза.

Использование стали 15НМФЛ по скорректированным (с применением компьютерных программ) технологиям литья позволило получать крупногабаритные стальные отливки массой до 3–4 т, обладающие высоким сопротивлением усталостному и хрупкому разрушениям. Это создало новые возможности в изготовлении и применении литосварных несущих (вместо цельносвар-

ных из листовой стали) конструкций самосвалов и тем самым резко сократить использование сварных соединений, практически всегда инициирующих разрушение [14]. Применение новой стали в конструкциях рам самосвалов БЕЛАЗ увеличило безремонтный пробег машин более чем в 10 раз, что решило проблему обеспечения надежности рам карьерных самосвалов в жизненном цикле машин (до 1–2 млн км пробега) и устранило тем самым значительные трудности ремонта при использовании самосвалов (особенно, в зоне экстремальных климатических температур), резко увеличив их конкурентоспособность.

Создание крупногабаритных цементированных зубчатых колес для карьерной техники требует применения сложнелегированных сталей для обеспечения повышенной твердости упрочненного слоя и сердцевины деталей. Однако высокое легирование часто приводит к заметному изменению формы и размеров деталей (короблению) как при их изготовлении, так и при работе редуктора, что снижает срок службы шестерен. Коробление после химико-термической обработки (ХТО) обычно устраняется шлифованием, что не только приводит к снижению прочности поверхностного слоя, но и требует специального оборудования и заметного увеличения затрат для производства деталей больших размеров. Для зубчатых колес со сложным профилем зубьев шлифование не всегда осуществимо, что становится труднопреодолимой проблемой в создании крупных цементированных конических шестерен с круговыми зубьями. Созданная и освоенная в металлургии и машиностроении конструкционная сталь 20ХНЗМА не только менее подвержена короблению при ХТО, но и выгодно отличается от известных материалов в части малоизученного фактора – сохранения формы и размеров деталей в процессе их эксплуатации [15]. Специальные исследования показали, что погрешности изменения направления зубьев при сравнительных стендовых (по замкнутому контуру) испытаниях у шестерен из стали 20ХНЗМА почти на порядок ниже, чем у аналогичных деталей из стали 20Х2Н4А (рис. 4). Прочностные характеристики упрочненного цементацией поверхностного слоя зубьев более высокие, чем у таких же деталей из применявшихся ранее материалов: стали 20ХНЗА или стали 20Х2Н4А (патент 16513 Респ. Беларусь, МПК С 22С 38/46 «Конструкционная легированная сталь», авторы – В. И. Моисеенко, Н. Д. Шкатуло). Указанные конструкционные и технологические свойства стали 20ХНЗМА открыли не только новые возможности в снижении затрат на шлифование всех крупномодульных зубчатых колес, но и в создании шестерен главных передач ведущих мостов самосвалов новой серии грузоподъемностью свыше 90 т, снабженных ГМТ [10].

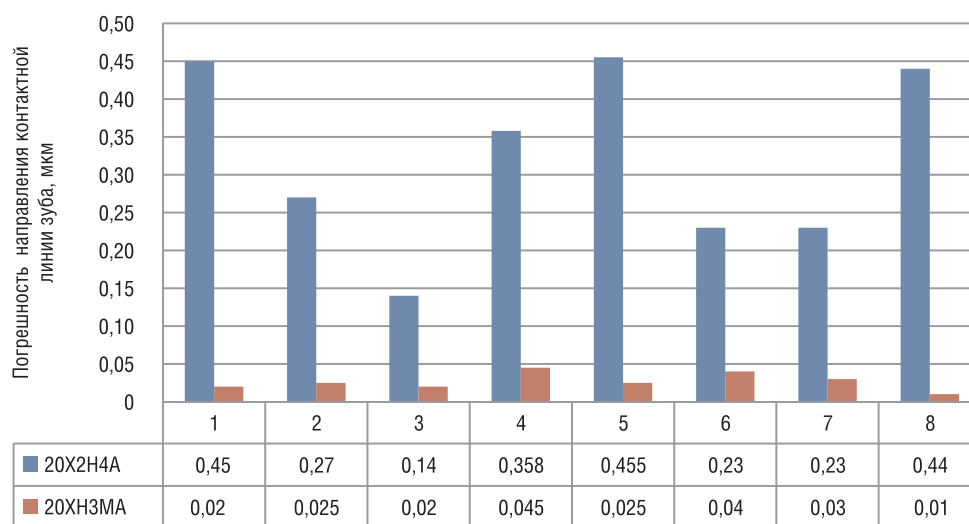


Рис. 4. Значение погрешности направления зуба у шестерен из сталей 20Х2Н4А и 20ХНЗМА после испытаний (200 ч)

Fig. 4. Error value direction of the gears of steel 20X2H4A and 20XH3MA after testing (200 hours)

Дополнительным и существенным фактором повышения несущей способности цементированных крупногабаритных зубчатых колес является созданный на основе фундаментальных исследований, выполненных в ОИМ НАН Беларуси совместно с Институтом электросварки имени Е. О. Патона (Украина) и Московским государственным университетом им. М. В. Ломоносова

(Россия), полный цикл уникального производства высоконадежных крупногабаритных зубчатых колес с использованием литой (недеформированной) заготовки, получаемой центробежным электрошлаковым литьем [14].

Высокая эффективность использования литых электрошлаковых заготовок подтверждена и распространена в последующих работах в смежных отраслях машиностроения [18]. Приведенные инновации позволили довести ресурс и надежность цементированных шестерен трансмиссий самосвалов марки «БЕЛАЗ» до уровня работоспособности техники ведущих производителей и снизить потребность в запчастях и объемах ремонтных работ при эксплуатации техники.

Азотированные зубчатые колеса, традиционно изготавливаемые из широко известных марок сталей (38Х2МЮА, 38ХМ, 40Х, 40ХН), обычно имеют невысокую твердость сердцевины (не более 240 НВ) как по причине низкой обрабатываемости материала, так и вследствие снижения твердости сердцевины деталей на стадии азотирования. При указанной твердости в деталях при эксплуатации развивается неравномерная циклическая макротекучесть материала, что дополнительно инициирует хрупкое разрушение азотированного слоя, его «шелушение», и является основной причиной выхода зубчатых колес (особенно крупногабаритных) из строя. При большом числе нарезаемых зубьев и высокой твердости заготовок крупномодульных зубчатых колес большого диаметра режущий инструмент, который невозможно заменить в процессе изготовления детали, теряет свои эксплуатационные характеристики, и необходимая точность деталей не обеспечивается. Впервые повышение твердости сердцевины деталей (до 280–300 НВ) из стали 38Х2МЮА без снижения их обрабатываемости достигнуто применением специальной запатентованной термообработки заготовок – «неполной закалки» [16]. При этом заметно повышается надежность и ресурс шестерен при толщине азотированного слоя 0,3–0,4 мм и его поверхностной твердости на уровне 900–1000 НВ, что крайне востребовано для деталей с повышенными требованиями по износостойкости.

Высокая эффективность отмечена и при использовании стали 40ХМФА. Ее применение для изготовления крупногабаритных (диаметром до 1200 мм и модулем зуба более 7 мм) азотированных зубчатых колес с внутренним зацеплением повысило надежность и ресурс деталей в гарантийный период эксплуатации и в жизненном цикле самосвалов при росте их грузоподъемности и увеличении уклонов карьерных дорог [17].

Положительный эффект применения стали 40ХМФА – также следствие использования указанной методологии целенаправленного формирования химического и структурного строения приграничных объемов зерен материала [14]. Регламентированное содержание в стали молибдена и ванадия повышает прокаливаемость и жаростойкость материала, а также толщину азотированного слоя и его характеристики, не снижая обрабатываемости зубчатых колес.

При использовании стали 40ХМФА и технологии ионно-плазменного азотирования, разработанного ФТИ НАН Беларуси, обеспечиваются необходимые для повышения прочности азотированных колес параметры: твердость сердцевины зубьев до 320 НВ, хорошая обрабатываемость и, как следствие, степень точности не ниже 7-й по ГОСТ 1643-81, глубина азотированного слоя – не менее 0,5–0,7 мм, при отсутствии хрупких фаз в нем, γ' -фаза не образует замкнутой сетки. Твердость поверхности – 650–750 НВ, что соизмеримо с твердостью поверхности цементированных зубчатых колес [17]. Процесс азотирования может осуществляться при повышенных температурах без снижения твердости, сформированной в заготовках до азотирования. В итоге это приводит к увеличению сопротивления изгибной и контактной усталости азотированного слоя и всей детали, в том числе и путем торможения при циклической нагрузке процесса локализации пластической деформации, инициирующей «шелушение» азотированного слоя деталей и ускоряющей их разрушение. Достигнутый уровень прочности азотированного слоя при использовании стали 40ХМФА позволяет в ряде конструкций применять азотированные зубчатые колеса (модуль менее 5 мм) вместо цементированных, что резко сокращает энергозатраты производства и повышает точность деталей, устраняя необходимость их шлифования.

Особо высокой несущей способностью и точностью обладают зубчатые колеса из новой запатентованной марки стали 20ХН4МФА. Твердость поверхностного слоя (до 900–950 НВ) и сердцевины деталей (до 40 HRC) из нового материала дополнительно повышаются при температурах азотирования [16].

Новые материалы и технологии, разработанные для изготовления зубчатых колес, позволили снизить аварийные отказы деталей в 5–6 раз в гарантийный период эксплуатации, а потребность в запчастях – в 5–10 раз.

Экономическая эффективность применения сталей 15НМФА, 20ХНЗМА и 40ХМФА оценивается в холдинге на уровне 1 млн долл. США по каждому из материалов. Стали марок 20ХНЗМА 40ХМФА вошли в перечень практически значимых разработок НАН Беларуси (Каталог практически значимых разработок НАН Беларуси в интересах экономики и социальной сферы Республики Беларусь. Минск: Беларус. навука, 2017. С. 37–38).

Заключение. Новая методология включает в себя научно обоснованные методы построения и реализации параметрического ряда и типажа карьерных самосвалов и позволяет своевременно прогнозировать и реагировать на перспективные запросы рынка с учетом происходящего углубления карьеров, увеличения грузоподъемности машин и их производительности, ужесточения экологических требований и наступающей эры цифровизации технологий горных работ. Составной частью указанной методологии являются и новые научно обоснованные подходы по обеспечению, повышению ресурса и технологичности (при проектировании и в производстве) крупногабаритных базовых систем, их агрегатов и деталей, исключая (или резко сокращающих) объемы ремонтных работ в жизненном цикле самосвалов.

Созданная и реализуемая в последние годы современная методология проектирования и производства карьерных самосвалов, основанная на научных новациях, позволила вывести Белорусский автомобильный завод в лидеры продаж указанной техники в мире (до 25–30 % рынка) на общую сумму 1 млрд долл. США при 12 тыс. занятых в производстве, что по удельному показателю является одним из рекордных достижений экспортеров Республики Беларусь.

Список использованных источников

1. Конструктивные схемы гусеничных самосвалов для работы в карьерах с повышенными уклонами выработок / П. И. Тарасов [и др.] // Гор. пром-сть. – 2008. – № 2. – С. 26.
2. Яковлев, В. Л. Проблемы, состояние и перспективы открытых горных разработок / В. Л. Яковлев // Проблемы карьерного транспорта: материалы X междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 14–16 окт. 2009 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. – С. 44.
3. Бахтурин, Ю. А. Обоснование прогноза формирования транспортных систем карьеров / Ю. А. Бахтурин // Проблемы карьерного транспорта: материалы X междунар. науч.-практ. конф., Екатеринбург, 14–16 окт. 2009 г. – Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2009. – С. 55–62.
4. Анистратов, К. Ю. Исследование показателей работы карьерных самосвалов для обоснования структуры парка и норм выработки автотранспорта / К. Ю. Анистратов, Л. В. Борщ-Компоницец // Гор. пром-сть. – 2011. – № 4. – С. 38–45.
5. Схемы вскрытия и отработки глубоких горизонтов алмазных карьеров крутонаклонными выработками / А. С. Чаадаев [и др.] // Гор. пром-сть. – 2008. – № 2. – С. 75.
6. Смирнов, В. П. Теория карьерного большегрузного автотранспорта / В. П. Смирнов, Ю. И. Лель. – Екатеринбург: УрО РАН, 2002. – 355 с.
7. Специализированные виды автотранспорта для горнодобывающих предприятий / В. П. Яковлев [и др.] // Гор. пром-сть. – 2007. – № 6. – С. 44–52.
8. Анистратов, К. Ю. Мировые тенденции развития структуры парка карьерной техники / К. Ю. Анистратов // Гор. пром-сть. – 2011. – № 6. – С. 22–26.
9. Новое в классификации современных карьерных самосвалов / П. А. Пархомчик [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2017. – Т. 6. – С. 81–85.
10. Современное развитие карьерного транспорта производства ОАО «БЕЛАЗ» / С. А. Шишко [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2018. – Вып. 7. – С. 8–11.
11. Обеспечение поперечной устойчивости карьерных самосвалов сверх особо большой грузоподъемности / А. Н. Егоров [и др.] // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2015. – Вып. 4. – С. 77–80.
12. Насковец, А. М. Поперечная устойчивость карьерных самосвалов для глубоких карьеров / А. М. Насковец, А. Н. Костюкович, В. И. Моисеенко // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси. – Минск, 2012. – Вып. 1. – С. 186–190.
13. Шишко, С. А. Обоснование выбора передаточных отношений ГМТ карьерных самосвалов особо большой грузоподъемности / С. А. Шишко, В. И. Моисеенко // Механика машин, механизмов и материалов. – 2016. – № 4. – С. 52–59.
14. Моисеенко, В. И. Основы структурной равнопрочности стали и элементов крупногабаритных деталей машин / В. И. Моисеенко, П. Л. Мариев. – Минск: Ин-т кибернетики НАН Беларуси, 1999. – 200 с.

15. Особенности применения конструкционной стали 20ХН3МА для крупногабаритных цементируемых зубчатых колес / П. А. Витязь [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2018. – №2. – С. 62–67.
16. Харитончик, Д. И. Крупногабаритные зубчатые колеса с внутренним зацеплением из алюминийсодержащих сталей / Д. И. Харитончик, В. И. Моисеенко. – Минск: Беларус. навука, 2012. – 125 с.
17. Новая конструкционная сталь для азотированных деталей / М. В. Сотников [и др.] // Сборник материалов VIII Международной конференции «Деформация и разрушение материалов и наноматериалов» / Ин-т металлургии и материаловедения им. А. А. Байкова РАН. – М., 2006. – С. 338–340.
18. Дудецкая, Л. Р. Исследование влияния микролегирования молибденом и ниобием на прокаливаемость и механические свойства конструкционных цементируемых сталей 20ХН3А и 20ХГНМ / Л. Р. Дудецкая, А. Н. Глушаков // Вестн. ГГТУ им. П. А. Сухого. – 2013. – №2. – С. 21–24.

References

1. Tarasov P. I., Glebov A. V., Furin V. O., Voroshilov A. G., Lobanov S. V., Nevolin V. M. Structural schemes of caterpillar dump trucks for work in quarries with increased slopes of mine workings. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2008, no. 2, p. 26 (in Russian).
2. Yakovlev V. L. Problems, state and prospects of open cast mining. *Problemy kar'ernogo transporta: materialy X mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ekaterinburg, 14–16 okt. 2009 g.* [Problems of career transport: Problems of open pit transport: materials of X international scientific and practical conference, Yekaterinburg, October 14–16. 2009]. Yekaterinburg, Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, 2009, pp. 44 (in Russian).
3. Bakhturin Y. A. The justification of the forecast for the formation of transport systems of quarries. *Problemy kar'ernogo transporta: materialy X mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Ekaterinburg, 14–16 okt. 2009 g.* [Problems of career transport: Problems of open pit transport: materials of X international scientific and practical conference, Yekaterinburg, October 14–16. 2009]. Yekaterinburg, Institute of Mining of the Ural Branch of RAS, 2009, pp. 55–62 (in Russian).
4. Anistratov K. Y., Borshch-Komponiets L. V. Study of performance indicators of mining dump trucks for substantiating the structure of the fleet and the norms for generating vehicles. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2011, no. 4 (98), pp. 38–45 (in Russian).
5. Chaadaev A. S., Akishev A. N., Bakhtin V. A., Babaskin S. L. Schemes for opening and mining deep horizons of diamond pits with steeply inclined workings. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2008, no. 2 (68), pp. 75 (in Russian).
6. Smirnov V. P., Lel' Y. I. *Theory of Career Heavy Vehicles*. Yekaterinburg, Ural Branch of RAS, 2002. 355 p. (in Russian).
7. Yakovlev V. L., Tarasov P. I., Zhuravlev A. G., Furin V. O., Voroshilov A. G., Tarasov A. P., Fefelov E. V. Specialized types of vehicles for mining enterprises. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2007, no. 6, pp. 44–52 (in Russian).
8. Anistratov K. Y. World trends in the development of the structure of the mining equipment fleet. *Gornaya promyshlennost' = Russian Mining Industry*, 2011, no. 6, pp. 22–26 (in Russian).
9. Parkhomchik P. A., Egorov A. N., Naskovets A. M., Vityaz P. A., Moiseenko V. I. New in the classification of modern mining trucks. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sbornik nauchnykh trudov* [Actual issues of engineering: a collection of scientific papers]. Minsk, Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 2017, iss. 6, pp. 81–85 (in Russian).
10. Shishko S. A., Naskovets A. M., Parkhomchik P. A., Egorov A. N., Moiseenko V. I. Modern development of open-pit mining vehicles manufactured by BELAZ OJSC *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sbornik nauchnykh trudov* [Actual issues of engineering: a collection of scientific papers]. Minsk, Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 2018, iss. 7, pp. 8–11 (in Russian).
11. Egorov A. N., Naskovets A. M., Kostyukovich A. N., Moiseenko V. I. Ensuring the lateral stability of mining dump trucks in excess of an especially large payload. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sbornik nauchnykh trudov* [Actual issues of engineering: a collection of scientific papers]. Minsk, Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 2015, iss. 4, pp. 77–80 (in Russian).
12. Naskovets A. M., Kostyukovich A. N., Moiseenko V. I. Transverse stability of mining trucks for deep pits. *Aktual'nye voprosy mashinovedeniya: sbornik nauchnykh trudov* [Actual issues of engineering: a collection of scientific papers]. Minsk, Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, 2012, iss. 1, pp. 186–190 (in Russian).
13. Shishko S. A., Moiseenko V. I. Justification of the selection of gear ratios of the umptera of dump trucks of especially heavy lifting capacity. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2016, no. 4, pp. 52–59 (in Russian).
14. Moiseenko V. I., Mariev P. L. *Fundamentals of Structural Equal Strength of Steel and Elements of Large-sized Machine Parts*. Minsk, Institute of Cybernetics of the National Academy of Sciences of Belarus, 1999. 200 p. (in Russian).
15. Vityaz P. A., Moiseenko V. I., Sidorenko A. G., Tomashevskii D. G., Shishko S. A. Features of the use of structural steel 20ХН3МА for large cemented gears. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 2018, no. 2, pp. 62–67 (in Russian).
16. Kharitonchik D. I., Moiseenko V. I. *Large-Sized Gearwheels with Internal Gearing from Aluminum-Containing Steels*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012. 125 p. (in Russian).
17. Sotnikov M. V., Sidorenko A. G., Moiseenko V. I., Shishko S. A. New structural steel for nitrided parts. *Sbornik materialov VIII Mezhdunarodnoi konferentsii "Deformatsiya i razrushenie materialov i nanomaterialov"* [Proceedings of the

VIII International Conference “Deformation and Fracture of Materials and Nanomaterials”. Moscow, A. A. Baykov Institute of Metallurgy and Materials Science RAS, 2006, pp. 338–340 (in Russian).

18. Dudetskaya L. R., Glushakov A. N. Investigation of the influence of microalloying with molybdenum and niobium on the penetration and mechanical properties of structural cemented steels 20XH3A and 20KHGNM. *Vestnik GGTU im. P. A. Sukhogo* [Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel], 2013, no. 2, pp. 21–24 (in Russian).

Информация об авторах

Пархомчик Петр Александрович – генеральный директор, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» (ул. 40 лет Октября, 4, 222161, Жодино, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: office@belaz.minsk.by

Витязь Петр Александрович – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, руководитель аппарата Национальной академии наук Беларуси (пр. Независимости 66, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vitiaz@presidium.bas-net.by

Егоров Александр Николаевич – генеральный конструктор – начальник научно-технического центра ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» (ул. 40 лет Октября, 4, 222161, Жодино, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: office@belaz.minsk.by

Моисеенко Владимир Иванович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник Объединенного института машиностроения Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая 12, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ks_oim@tut.by

Насковец Александр Михайлович – начальник бюро общей компоновки, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» (ул. 40 лет Октября, 4, 222161, Жодино, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: office@belaz.minsk.by

Харитончик Дмитрий Иванович – заместитель министра промышленности Республики Беларусь, Министерство промышленности Республики Беларусь (Партизанский пр., 2, корп. 4, 220033, Минск, Республика Беларусь). E-mail: minprom4@minprom.gov.by

Шишко Сергей Александрович – заместитель главного конструктора, ОАО «БЕЛАЗ» – управляющая компания холдинга «БЕЛАЗ-ХОЛДИНГ» (ул. 40 лет Октября, 4, 222161, Жодино, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: office@belaz.minsk.by

Information about the authors

Pyotr A. Parkhomchik – General Director of OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING” (4, 40 let Oktyabrya Str., 222161, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: office@belaz.minsk.by

Pyotr A. Vitiaz – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, D. Sc. (Engineering), Professor, Head of Academy Staff of the National Academy of Sciences of Belarus (66, Nezavisimosti Ave., 220072, Minsk, Republic of Belarus), E-mail: vitiaz@presidium.basnet.by

Alexander N. Egorov – General Designer – Head of the Scientific and Technical Center of OJSC “BELAZ” – Management Company of the Holding “BELAZ-HOLDING” (4, 40 let Oktyabrya Str., 222161, Zhodino, Minsk region, Belarus). E-mail: office@belaz.minsk.by

Vladimir I. Moiseenko – D. Sc. (Engineering), Professor, Head Researcher, Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (12, Akademicheskaja Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ks_oim@tut.by

Alexander M. Naskovets – Head of the General Layout Bureau, OJSC “BELAZ” – Management Company of Holding “BELAZ-HOLDING” (4, 40 let Oktyabrya Str., 222161, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: office@belaz.minsk.by

Dmitry I. Haritonchik – Deputy Minister of Industry of the Republic of Belarus, Ministry of Industry of the Republic of Belarus (2, building 4, Partizansky Ave., 220033, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: minprom4@minprom.gov.by

Sergey A. Shishko – Deputy Chief Designer, OJSC “BELAZ” – Managing Company of Holding “BELAZ-HOLDING” (4, 40 let Oktyabrya Str., 222161, Zhodino, Minsk region, Republic of Belarus). E-mail: office@belaz.minsk.by

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 681.7.023.72

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>

Поступила в редакцию 21.12.2018

Received 21.12.2018

А. С. Козерук¹, Р. О. Диас Гонсалес^{1,2}, М. И. Филонова¹, В. О. Кузнецик¹, Е. Н. Варопай¹¹Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь²Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо, Мериды, Венесуэла**КИНЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОСОБА, ПОВЫШАЮЩЕГО ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ**

Аннотация. Предложен способ получения высокоточных конических поверхностей в условиях свободного притирания, позволяющий регулировать параметры процесса обработки конической детали в зависимости от распределения подлежащего удалению припуска с ее поверхности. Приведена схема реализации способа, в которой основными звеньями являются инструмент с плоской рабочей поверхностью и правильник в виде стеклянной пластины, предназначенный для поддержания необходимой точности обрабатываемой поверхности инструмента. Для разработки методики управления срабатыванием рабочей поверхности инструмента с целью обеспечения необходимой точности ее плоскостности выполнен анализ закономерностей движения звеньев исполнительного механизма базового станка, на котором устанавливается предлагаемое устройство для обработки конических деталей. Рассмотрена структура исполнительного механизма рычажного станка, установлена связь между обобщенной координатой и положениями звеньев этого механизма в процессе обработки с учетом возвратно-вращательного движения деталей относительно инструмента в условиях свободного притирания, исследовано положение рычага и верхнего звена в вертикальной плоскости, рассмотрены геометрические параметры колебательного перемещения верхнего звена. Получено соотношение для расчета длины кривошипа исполнительного механизма станка в зависимости от амплитуды переносного движения его выходного звена. Установлена аналитическая связь между входным и выходным звеньями исполнительного механизма станка, что дает возможность рассчитать длину первого из отмеченных звеньев в зависимости от требуемой величины амплитуды колебательного движения второго из них и создает предпосылки для разработки инженерных методов управления процессом формообразования высокоточных конических поверхностей в условиях свободного притирания.

Ключевые слова: коническая поверхность, свободное притирание, сепаратор, рычажный станок, исполнительный механизм, входное и выходное звенья, наладочные параметры

Для цитирования: Кинематический анализ способа, повышающего точность обработки конических поверхностей / А. С. Козерук [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 197–204. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>

Albin S. Kozeruk¹, Rafael' Orlandos Dias Gonsales^{1,2}, Marina I. Filonova¹, Valeria O. Kuznechik¹, Evgeny N. Varopay¹¹Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus²University Polytechnic Institute of Santiago Marino, Merida, Venezuela**KINEMATIC ANALYSIS OF THE METHOD INCREASING THE ACCURACY OF TREATMENT OF CONIC SURFACES**

Abstract. A method for processing high-precision conical surfaces under conditions of free grinding on a lever machine is proposed, which allows adjusting the process parameters taking into account the technological heredity of the workpiece from the point of view of the distribution pattern of the allowance to be removed from its surface. The scheme of implementation of the method in which the main links are a tool in the form of a faceplate and a separator for maintaining the required accuracy of its flatness. In order to develop a method of targeted control of the actuation of the working surface of the tool to maintain the required accuracy of its flatness, mathematical modeling of the motion patterns of the links of the actuator of the base machine, on which the proposed device for processing conical parts is installed, was performed. In the process of mathematical simulation structural analysis of the executive mechanism of the lever machine is carried out, connection between the generalized coordinate and provisions of links of the executive mechanism of the lever machine is established, position of the lever and the upper link in the vertical plane is probed, geometrical parameters of reflexive rotational motion of the upper link are considered, the ratio for calculation of length of a crank of the executive mechanism of the machine depending on amplitude of figurative movement of its output link is obtained. An analytical relationship has been established between the input and output links of the machine actuator, which makes it possible to calculate the length of the first of the marked links depending on the required amplitude of the oscillatory motion of the second of them and creates the prerequisites for the development of engineering methods for controlling the process of forming high-precision conical surfaces under conditions of free grinding.

Keywords: conical surface, free rubbing, separator, lever machine, actuating mechanism, input and output links, adjustment parameters

For citation: Kozेरuk A. S., Dias Gonsales R. O., Filonova M. I., Kuznechik V. O., Varopay E. N. Kinematic analysis of the method increasing the accuracy of treatment of conic surfaces. *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. 2, pp. 197–204 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-197-204>

Введение. При обработке конических поверхностей в машиностроении используют в основном методы обработки в условиях геометрического замыкания на токарных станках (патент 2131325 РФ, МПК В 23В 5/38 «Способ обработки конических поверхностей вращения», авторы – В. В. Лоцманенко, М. В. Лоцманенко; патент 2016704 РФ, МПК В 23В 5/38 «Станок для обработки конических сопрягаемых поверхностей», авторы – А. М. Мелай [и др.]; патент 2071395 РФ, МПК В 23С 3/04 «Способ обработки конической поверхности детали», авторы – И. А. Марченко, Ю. Н. Зорин, В. В. Щенев) или с применением специальных приспособлений (патент 2065801 РФ, МПК В 23В 41/06 «Устройство для обработки конических поверхностей», авторы – Н. К. Гришко [и др.]). Такая технология ввиду наличия вибрации в технологическом оборудовании не позволяет получить конические поверхности с высокой степенью точности ее образующей (прямолинейности и правильной геометрической формы поперечного сечения по всей высоте конуса с погрешностью не более $\pm 0,25$ мкм [1, 2]). Упомянутых недостатков можно избежать, если использовать метод свободного притирания, в котором контакт инструмента и заготовки обеспечивается их силовым замыканием, причем одна из притирающихся поверхностей в процессе обработки непрерывно самоустанавливается на другой [3]. Согласно этому методу применяют инструмент с плоской рабочей поверхностью, а заготовке сообщают вращение вокруг ее оси симметрии и сложное переносное движение, состоящее из вращательного вокруг оси симметрии инструмента и возвратно-вращательное в направлении, перпендикулярном данной оси, при этом обработку ведут путем регулирования скоростей вращения инструмента, переносного движения заготовки и амплитуды этого движения (патент 17104 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/00 «Устройство для обработки деталей с коническими поверхностями», авторы – А. С. Козерук [и др.]; патент 21163 Респ. Беларусь, МПК В 24В 13/02 «Устройство для групповой обработки деталей с коническими поверхностями», авторы – А. С. Козерук [и др.]).

Недостатком технологии обработки конических поверхностей по методу свободного притирания (другого метода обработки конической поверхности оптических деталей в открытом доступе не выявлено) является непостоянство скорости вращения заготовки вокруг собственной оси симметрии, поскольку эта скорость обусловлена наличием между обрабатываемой поверхностью и рабочей поверхностью инструмента сил трения, которые носят нестабильный характер из-за неравномерного распределения обрабатываемой абразивной суспензии [4].

Отмеченное устраняется, если образующую конуса расположить в контактирующей с инструментом плоскости сепаратора, регулированием относительной и переносной скоростей которого по инструменту поддерживают необходимую плоскостность его рабочей поверхности. С целью разработки приемов инженерного управления упомянутыми скоростями требуется выполнить математическое моделирование технологического оборудования для обработки конических поверхностей, чему и посвящена настоящая работа.

Схема обработки. Схема реализации обработки конических поверхностей по методу свободного притирания приведена на рис. 1. Здесь на инструменте 1 расположен сепаратор 2, в отверстие А которого помещена конусообразная заготовка 3. Сепаратор закреплен на клеичном инструменте 4, шарнирно соединенном с поводком 5 выходного звена исполнительного механизма базового станка. При этом инструмент, заготовка и сепаратор установлены с возможностью регулируемого вращения со скоростями $\omega_{и}$, ω_3 и $\omega_с$ соответственно, причем сепаратор в процессе обработки совершает также возвратно-вращательное движение со скоростью $\omega_{в-в}$.

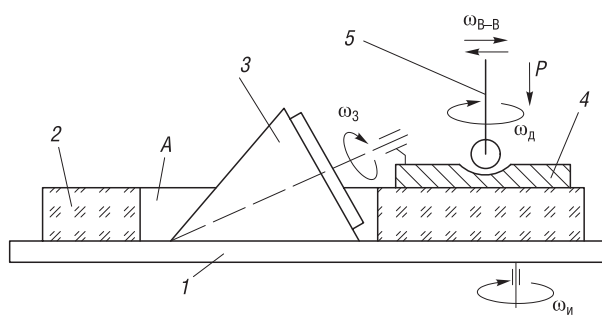


Рис. 1. Схема обработки конической детали
Fig. 1. Processing scheme of the conical parts

но притирания приведена на рис. 1. Здесь на инструменте 1 расположен сепаратор 2, в отверстие А которого помещена конусообразная заготовка 3. Сепаратор закреплен на клеичном инструменте 4, шарнирно соединенном с поводком 5 выходного звена исполнительного механизма базового станка. При этом инструмент, заготовка и сепаратор установлены с возможностью регулируемого вращения со скоростями $\omega_{и}$, ω_3 и $\omega_с$ соответственно, причем сепаратор в процессе обработки совершает также возвратно-вращательное движение со скоростью $\omega_{в-в}$.

Предлагаемая схема обработки конических поверхностей может быть реализована на серийном рычажном станке [5]. Для управления процессом обработки на этом технологическом оборудовании, при котором обеспечивается равномерное срабатывание рабочей поверхности инструмента, непосредственно влияющей на прямолинейность образующей конуса, выполним структурный анализ исполнительного механизма рычажного станка, кинематическая схема которого представлена на рис. 2.

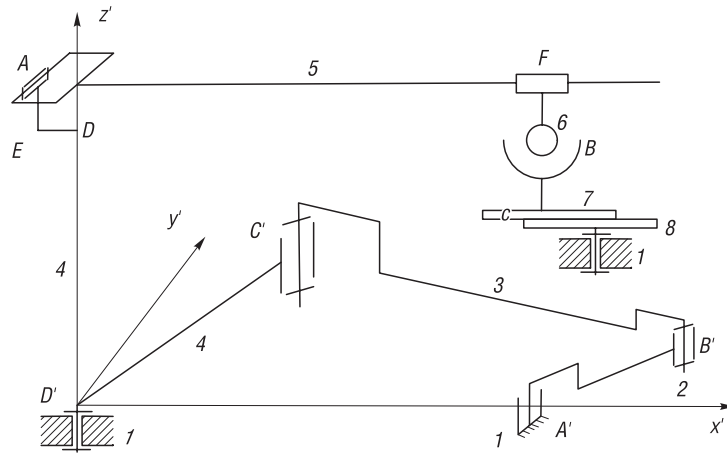


Рис. 2. Кинематическая схема исполнительного механизма рычажного станка
 Fig. 2. Kinematic diagram of the actuating mechanism of the lever machine

Звенья 2 и 3 этого механизма расположены в плоскости $D'x'y'$, а звенья 4, 5 и 6 – в плоскости, перпендикулярной $D'x'y'$. Звено 2 с неподвижным звеном 1, а также звенья 2 и 3, 3 и 4, 4 и 1, 4 и 5, 8 и 1 образуют вращательные кинематические пары, звенья 5 и 6 – поступательную пару. Верхнее звено 7 составляет сферическую пару со звеном 6 и плоскую с нижним звеном 8. При этом звенья 1, 2, 3, 4 образуют шарнирный четырехзвенник [6].

Механизм шарнирного четырехзвенника работает следующим образом. Вращательное движение кривошипа 2 через шатун 3 преобразуется в возвратно-вращательное движение звена 4 и рычага 5. Последний через поводок 6 вызывает возвратно-вращательное перемещение верхнего звена 7 относительно нижнего 8.

Связь между обобщенной координатой и положениями звеньев исполнительного механизма рычажного станка. Поскольку звенья 4, 5 и 6 в процессе обработки плоских поверхностей не изменяют своего положения относительно друг друга и их можно рассматривать как одно звено, то для описания движения исполнительного механизма станка достаточно исследовать движение шарнирного четырехзвенника 1–2–3–4, векторная схема которого приведена на рис. 3.

Введем в рассмотрение векторы $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \vec{l}_3, \vec{l}_4$ и \vec{s} , как это показано на рис. 3.

Из анализа этого рисунка следует, что

$$\operatorname{tg} \varphi_s = \frac{l_2 \sin \varphi_2}{l_1 + l_2 \cos \varphi_2}. \quad (1)$$

Если ввести в рассмотрение угол φ_{4s} , который отсчитывается против часовой стрелки от вектора \vec{s} до вектора \vec{l}_4 и, как видно из рис. 3, выражается соотношением

$$\varphi_{4s} = \arccos \frac{l_4^2 + s^2 - l_3^2}{2l_4s}, \quad (2)$$

то тем самым устанавливается связь между положениями входного звена (кривошипа) 2

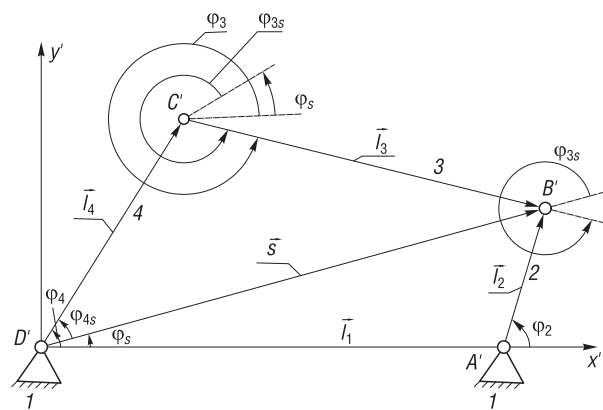


Рис. 3. Векторная схема шарнирного четырехзвенника исполнительного механизма рычажного станка
 Fig. 3. Vector diagram of the articulated four of the actuating mechanism of the lever machine

и звена 4 (см. рис. 2), а следовательно, и между положением кривошипа и рычага 5, так как последний перемещается относительно звена 4 только в вертикальной плоскости, при этом

$$\varphi_5 = \varphi_4 + \varphi_{45}, \quad (3)$$

где φ_{45} – постоянный угол, величина которого зависит от конструкции конкретного станка; φ_5 – угол, задающий положение рычага 5 в горизонтальной плоскости; $\varphi_4 = \varphi_{45} + \varphi_5$ – угол, определяющий положение звена 4. При обработке плоских поверхностей угол φ_5 определяет также и положение верхнего звена. Входящие в выражение (2) параметры s , l_3 и l_4 можно найти из рис. 3.

Положение рычага и верхнего звена в вертикальной плоскости. Заметим, что в общем случае звено 5 (см. рис. 2) расположено не горизонтально. Его положение в вертикальной плоскости зависит от геометрических параметров станка, длины поводка b и размеров сопряженных звеньев, как это показано на рис. 4, где l_5 – размер звена 5 до нулевого положения F_0 на нем поводка b ; M – смещение поводка; z_6 – расстояние между плоскостью шарнирного четырехзвенника и базовой плоскостью bb установки нижнего звена; h_H и h_B размеры нижнего и верхнего звеньев; x_G – расстояние между осью нижнего звена и осью возвратно-вращательного движения верхнего звена.

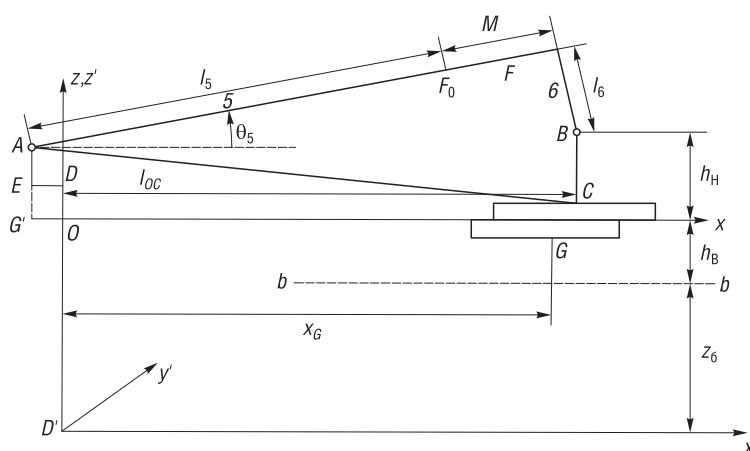


Рис. 4. Определению положения верхнего звена в вертикальной плоскости
Fig. 4. Determine the position of the upper link in the vertical plane

Угол между звеном 5 и горизонтальной плоскостью $D'x'y'$ обозначим θ_5 и будем отсчитывать его от горизонтальной плоскости против часовой стрелки. На рис. 4 θ_5 имеет положительное значение.

В результате введенных обозначений получаем размерную цепь, приведенную на рис. 5, где e – эксцентриситет, то есть расстояние между центрами G и C рабочих поверхностей сопряженных звеньев (инструмента и заготовки).

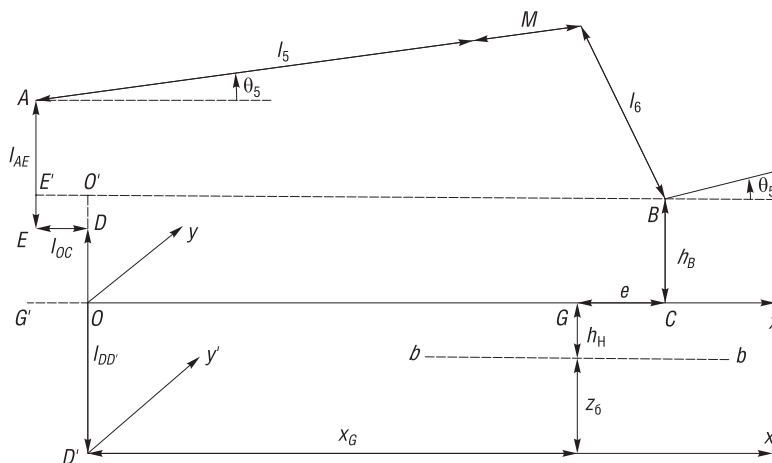


Рис. 5. Размерная цепь геометрических параметров станка, инструмента и заготовки
Fig. 5. Dimensional chain of geometrical parameters of the machine, tool and workpiece

Отметим, что в рассматриваемом случае эксцентриситет является переменной величиной и зависит от положения верхнего звена относительно нижнего.

Анализ приведенной на рис. 5 размерной цепи позволяет определить угол θ_5 и расстояние l_{OC} от оси возвратно-вращательного движения верхнего звена до центра C его рабочей поверхности.

Из рис. 5 видно, что $l_{OC} = l_{O'B}$, а $l_{O'B} = l_{E'B} - l_{ED}$.

Согласно построениям, ABE' – прямоугольный треугольник и

$$l_{BE'}^2 = l_{AB}^2 - l_{AE'}^2 = (l_5 + M)^2 + l_6^2 - l_{AE'}^2,$$

причем

$$l_{AE'} = l_{DD'} + l_{AE} - z_6 + h_H + h_B.$$

Обозначим

$$h_4 = l_{DD'} + l_{AE},$$

тогда

$$l_{AE'} = h_4 - (z_6 + h_H + h_B),$$

$$l_{OC} = \sqrt{(l_5 + M)^2 + l_6^2 - (h_4 - z_6 - h_H - h_B)^2} - l_{ED}. \quad (4)$$

Так как

$$\theta_5 = \angle FAB - \angle ABE',$$

и

$$\angle ABE' = \arctg \frac{l_{AE'}}{l_{OC} + l_{ED}} = \arctg \frac{h_4 - z_6 - h_H - h_B}{\sqrt{(l_5 + M)^2 + l_6^2 - (h_4 - z_6 - h_H - h_B)^2}},$$

$$\angle FAB = \arctg \frac{l_6}{l_5 + M},$$

то

$$\theta_5 = \arctg \frac{l_6}{l_5 + M} - \arctg \frac{h_4 - z_6 - h_H - h_B}{\sqrt{(l_5 + M)^2 + l_6^2 - (h_4 - z_6 - h_H - h_B)^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, выражения (3) и (5) позволяют определить положение звена 5 для любого значения обобщенной координаты. Заметим, что угол θ_5 , описывающий положение этого звена в вертикальной плоскости, не зависит от обобщенной координаты и практически не изменяется в процессе обработки плоских поверхностей. Как видно из выражения (5), этот угол определяется геометрическими параметрами станка (x_G, z_6, h_4, l_5, l_6) и сопряженных звеньев (h_H, h_B), а также параметром M .

Геометрические параметры возвратно-вращательного движения верхнего звена.

Возвратно-вращательное движение верхнего звена определяется движением центра C его рабочей поверхности. Положение радиус-вектора \vec{l}_{OC} этого центра в горизонтальной плоскости будем характеризовать углом ψ_C (рис. 6). При обработке плоских поверхностей этот вектор и рычаг 5 все время расположены в одной вертикальной плоскости, следовательно

$$\psi_C = \varphi_5. \quad (6)$$

Геометрическими параметрами возвратно-вращательного движения верхнего звена являются углы $\psi_C^{\text{сим}}$, ψ_C^{min} и ψ_C^{max} , определяющие положение оси симметрии траектории K центра C и его крайние положения соответственно. Из выражений (3) и (6) видно, что для определения этих углов достаточно найти углы $\varphi_4^{\text{сим}}$, φ_4^{min} и φ_4^{max} , которые характеризуют возвратно-вращательное движение коромысла.

Из анализа рис. 3 видно, что коромысло 4, а значит, и верхнее звено 5 (см. рис. 2) крайние положения занимают тогда, когда звенья 2 и 3 лежат на одной прямой. При этом нетрудно заметить, что чем меньше длина кривошипа l_2 , тем меньше диапазон изменения угла φ_4 . В случае, когда $l_2 \rightarrow 0$, φ_4 стремится к $\varphi_4^{\text{сим}}$. И если принять $l_2 = 0$, то механизм станет неподвижным и φ_4 будет равным $\varphi_4^{\text{сим}}$. Что касается аналитических выражений для углов $\varphi_4^{\text{сим}}$, φ_4^{max} и φ_4^{min} , то, как следует из рис. 3, они следующие:

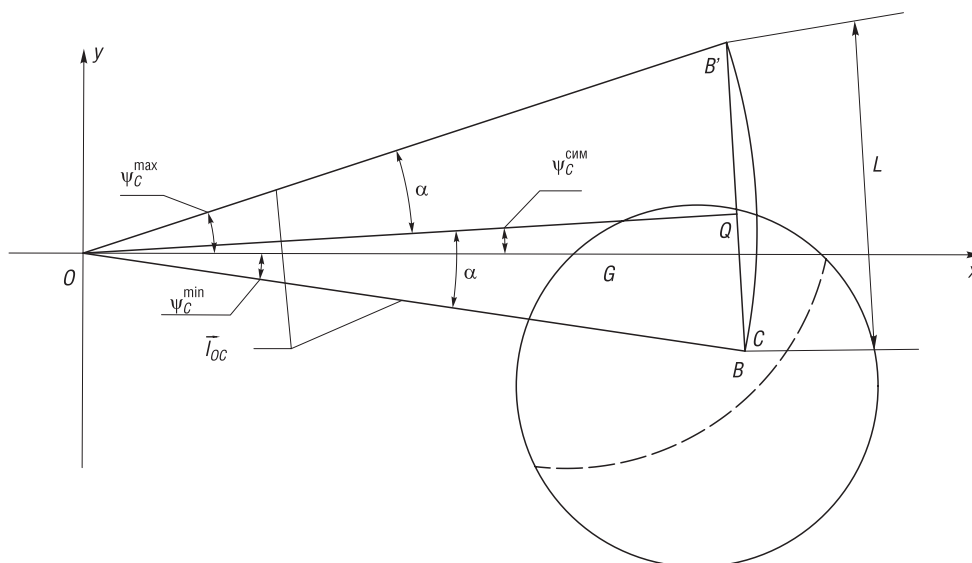


Рис. 6. Траектория возвратно-вращательного движения центра с рабочей поверхностью верхнего звена
 Fig. 6. Trajectory of the reciprocating rotational movement of the center with the working surface of the upper link

$$\cos \varphi_4^{\text{сим}} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - l_3^2}{2l_1l_4}, \quad (7)$$

$$\cos \varphi_4^{\text{max}} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_2 + l_3)^2}{2l_1l_4}, \quad (8)$$

$$\cos \varphi_4^{\text{min}} = \frac{l_1^2 + l_4^2 - (l_3 - l_2)^2}{2l_1l_4}. \quad (9)$$

Таким образом, выражения (6)–(9) и (3) позволяют определить предельные и средние значения углов φ_4 , φ_5 и ψ_C при обработке плоскостей.

Анализ рис. 3 показывает также, что значения $(\varphi_2^{\text{п}})_1$ и $(\varphi_2^{\text{п}})_2$ обобщенной координаты φ_2 , при которых происходит перемена направления движения верхнего звена, определяются соотношениями:

$$(\varphi_2^{\text{п}})_1 = \pi - \arccos \frac{l_1^2 + (l_2 + l_3)^2 - l_4^2}{2l_1(l_2 + l_3)}, \quad (10)$$

$$(\varphi_2^{\text{п}})_2 = 2\pi - \arccos \frac{l_1^2 + (l_3 - l_2)^2 - l_4^2}{2l_1(l_3 - l_2)}. \quad (11)$$

Следовательно, при вращении кривошипа против часовой стрелки верхнее звено, а также ко­ромысло и рычаг движутся против часовой стрелки при $0 \leq \varphi_2 < (\varphi_2^{\text{п}})_1$ и $(\varphi_2^{\text{п}})_2 < \varphi_2 \leq 2\pi$ и по часо­вой стрелке при $(\varphi_2^{\text{п}})_1 < \varphi_2 < (\varphi_2^{\text{п}})_2$. Значения обобщенной координаты $\varphi_2 = (\varphi_2^{\text{п}})_1$ и $\varphi_2 = (\varphi_2^{\text{п}})_2$ яв­ляются точками реверса, то есть точками мгновенной остановки верхнего звена в его возвратно-вращательном движении.

Выясним условия, при которых возвратно-вращательное движение верхнего звена будет сим­метричным относительно оси Ox , проходящей через центр G рабочей поверхности нижнего зве­на. Согласно рис. 6, это условие запишется следующим образом: $\psi_4^{\text{сим}} = 0$. Тогда с учетом выра­жений (3), (5) и (6) получаем, что

$$l_3 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \varphi_{45}}. \quad (12)$$

Связь между длиной штриха и длиной кривошипа. Проекция на горизонтальную плоскость расстояния между крайними положениями центра B шарика поводка (см. рис. 6) является геометрическим наладочным параметром и называется длиной штриха L .

Поскольку при обработке плоских поверхностей центр шарика поводка и центр C рабочей поверхности верхнего звена находятся на одной вертикальной линии, то расстояние между крайними положениями центра C также равно L .

В рычажных станках величина L регулируется посредством изменения длины кривошипа l_2 , следовательно, необходимо установить аналитическую связь между этими геометрическими параметрами.

Введем обозначение (см. рис. 6): $\alpha = \frac{\psi_C^{\max} - \psi_C^{\min}}{2}$. Тогда $\psi_C^{\max} = \psi_C^{\text{сим}} + \alpha$, $\psi_C^{\min} = \psi_C^{\text{сим}} - \alpha$.

Учитывая выражение для угла α , получаем:

$$\psi_C^{\max} = \psi_C^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}, \psi_C^{\min} = \psi_C^{\text{сим}} - \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}.$$

Аналогичные равенства можно записать и для угла φ_4 :

$$\varphi_4^{\max} = \varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}, \varphi_4^{\min} = \varphi_4^{\text{сим}} - \arcsin \frac{L}{2l_{OC}}.$$

Учитывая зависимости (6) и (11), определим выражение для l_2 :

$$l_2 = \sqrt{l_1^2 + l_4^2 - 2l_1l_4 \cos \left(\varphi_4^{\text{сим}} + \arcsin \frac{L}{2l_{OC}} \right)} - l_3. \quad (13)$$

Заключение. В результате проведенного исследования шарнирного четырехзвенника исполнительного механизма станка установлена аналитическая связь между входным и выходным звеньями этого механизма. Это дает возможность рассчитать длину первого из отмеченных звеньев в зависимости от требуемой величины амплитуды колебательного движения второго из них и создает предпосылки для разработки инженерных методов управления процессом формообразования высокоточных конических поверхностей в условиях свободного притирания, позволяя тем самым исключить необходимость проведения предварительных трудоемких экспериментов по выявлению оптимальных наладочных параметров технологического оборудования в каждом конкретном случае.

Список использованных источников

1. Бардин, А. Н. Технология оптического стекла / А. Н. Бардин. – М.: Высш. шк., 1963. – 519 с.
2. Зубаков, В. Г. Технология оптических деталей / В. Г. Зубаков, М. Н. Семибратов, С. К. Штандель; под ред. М. Н. Семибратова. – М.: Машиностроение, 1985. – 368 с.
3. Козерук, А. С. Формообразование прецизионных поверхностей / А. С. Козерук. – Минск: ВУЗ – ЮНИТИ, 1997. – 176 с.
4. Козерук, А. С. Управление формообразованием прецизионных поверхностей деталей машин и приборов на основе математического моделирования: дис. ... д-ра техн. наук: 05.03.01, 05.02.08 / А. С. Козерук. – Минск, 1997. – 317 л.
5. Сулим, А. М. Производство оптических деталей / А. В. Сулим. – М.: Высш. шк., 1969. – 303 с.
6. Артоболевский, И. И. Теория механизмов и машин / И. И. Артоболевский. – М.: Наука, 1988. – 640 с.

References

1. Bardin A. N. *Optical glass technology*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1963. 519 p. (in Russian).
2. Zubakov, V. G., Semibratov M. N., Shtandel S. K. *Optical Parts Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 368 p. (in Russian).
3. Kozeruk A. S. *Shaping Precision Surfaces*. Minsk, VUZ – YuNITI Publ., 1997. 176 p. (in Russian).
4. Kozeruk A. S. (1997) *Managing the shaping of precision surfaces of machine parts and devices based on mathematical modeling*. Minsk. 317 p. (in Russian).
5. Sulim, A. M. *Production of optical parts*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1969. 303 p. (in Russian).
6. Artobolevskii I. I. *Theory of Mechanisms and Machines*. Moscow, Nauka Publ., 1988. 640 p. (in Russian).

Информация об авторах

Козерук Альбин Степанович – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: akozeryk@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>

Диас Гонсалес Рафаэль Орландос – аспирант, Университетский политехнический институт Сантьяго Мариньо (Мерида, Венесуэла).

Филонова Марина Игоревна – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: filonovami@mail.ru

Кузнечик Валерия Ольгердовна – кандидат технических наук, доцент, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v-kuzn@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-5348-5871>

Варопай Евгений Николаевич – магистрант, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: zhekakop@gmail.com

Information about the authors

Albin S. Kozeruk – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: akozeryk@gmail.com. <https://orcid.org/0000-0001-5484-9294>

Rafael' Orlandos Dias Gonsales – Graduate Student, Instituto Universitario Politecnico Santiago Marino (Merida, Venezuela)

Marina I. Filonova – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: filonovami@mail.ru

Valeria O. Kuznechik – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v-kuzn@tut.by. <https://orcid.org/0000-0001-5348-5871>

Evgeny N. Varopay – Undergraduate, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: zhekakop@gmail.com

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 699.531.433

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-205-214>

Поступила в редакцию 24.06.2019

Received 24.06.2019

О. М. Дьяконов*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь***БРИКЕТИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Выполнено решение осесимметричной задачи теории прессования пористых тел с практическим применением в виде силового расчета металлургических процессов брикетирования мелкофракционных сыпучих материалов: порошковых, стружковых, гранулированных и других отходов металлообработки. У таких материалов форма частиц (структурных элементов) не является геометрически правильной или вообще определенной. Это послужило основанием для того, что в основу решения была положена континуальная модель пористого тела. В результате приведения этой модели к двумерной пространственной модели получено замкнутое аналитическое решение методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и энергетического условия пластичности Губера–Мизеса. В качестве рабочих гипотез приняты следующие допущения: нормальное радиальное напряжение равно тангенциальному, коэффициент бокового давления равен относительной плотности прессовки. В силу того что задача решена в общем виде и в общей постановке, само решение следует рассматривать как методологическое применительно к любой схеме осесимметричного нагружения. Получены трансцендентные уравнения деформационного уплотнения пористого тела как для идеального процесса прессования, так и с учетом сил контактного трения. В результате разработки метода решения этих уравнений выведены формулы для расчета локальных характеристик напряженного состояния прессовки, а также интегральных параметров процесса прессования: давления, усилия и работы деформации.

Ключевые слова: металл, пористость, модель, континуум, прессование, симметрия, напряжение, давление, усилие, деформация

Для цитирования: Дьяконов, О. М. Брикетирование структурно-неоднородных пористых материалов / О. М. Дьяконов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 205–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-205-214>

Oleg M. Dyakonov*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus***BRIQUETTING OF STRUCTURALLY INHOMOGENEOUS POROUS MATERIALS**

Abstract. The work is devoted to solving the axisymmetric problem of the theory of pressing porous bodies with practical application in the form of force calculation of metallurgical processes of briquetting small fractional bulk materials: powder, chip, granulated and other metalworking wastes. For such materials, the shape of the particles (structural elements) is not geometrically correct or generally definable. This was the basis for the decision to be based on the continual model of a porous body. As a result of bringing this model to a two-dimensional spatial model, a closed analytical solution was obtained by the method of jointly solving differential equilibrium equations and the Guber–Mises energy condition of plasticity. The following assumptions were adopted as working hypotheses: the normal radial stress is equal to the tangential one, the lateral pressure coefficient is equal to the relative density of the compact. Due to the fact that the problem is solved in a general form and in a general formulation, the solution itself should be considered as methodological for any axisymmetric loading scheme. The transcendental equations of the deformation compaction of a porous body are obtained both for an ideal pressing process and taking into account contact friction forces. As a result of the development of a method for solving these equations, the formulas for calculating the local characteristics of the stressed state of the pressing, as well as the integral parameters of the pressing process are derived: pressure, stress, and deformation work.

Keywords: metal, porosity, model, continuum, pressing, symmetry, stress, pressure, force, deformation

For citation: Dyakonov O. M. Briquetting of structurally inhomogeneous porous materials. *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. 2, pp. 205–214 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-205-214>

Введение. Пористые тела образуют порошковые, стружковые, гранулированные и другие сыпучие металлические материалы, которые в силу классификации по химическому составу и размерам частиц (структурных элементов) следует отнести к разряду структурно-неоднородных

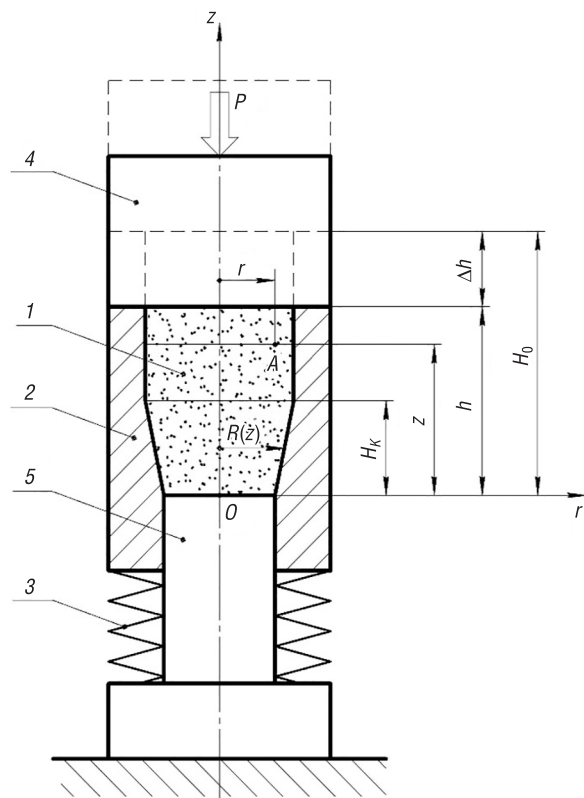


Рис. 1. Технологическая схема прессования пористого тела в подвижной матрице

Fig. 1. Technological scheme of pressing a porous body in a moving matrix

момент осесимметричного нагружения описывается уравнением $R = R(z)$. Силовой расчет производим без учета сил контактного трения.

Для любой точки очага деформации дифференциальные уравнения равновесия в цилиндрических координатах записываются следующим образом:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\phi}{r} = 0; \tag{1}$$

$$\frac{\partial \tau_{zr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{zr}}{r} = 0. \tag{2}$$

Условие пластичности Губера–Мизеса имеет вид

$$(\sigma_r - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 + 6\tau_{rz}^2 = 2\sigma_s^2. \tag{3}$$

Элементарный объем прессовки с компонентами тензора напряженного состояния показан на рис. 2. В условиях осесимметричного нагружения в меридианных плоскостях, проходящих через ось z (плоскостях ϕ), касательные напряжения равны нулю. Компоненты напряжений не зависят от координаты ϕ .

Согласно условию полной пластичности Хаара–Кармана [1], когда течение металла в радиальном направлении ограничено стенкой матрицы, а в тангенциальном кинематически запрещено вследствие симметричного разграничения в плоскостях ϕ , можно принять, что $\sigma_r = \sigma_\phi$. При этом как осевое нормальное σ_z , так и нормальное радиальное σ_r напряжения зависят от непрерывно увеличивающейся плотности прессовки ρ . Между собой они связаны коэффициентом бокового давления, который при условии полной пластичности равен относительной плотности прессовки δ [2–4]:

$$\sigma_r = \sigma_\phi = \delta \sigma_z. \tag{4}$$

материалов. В большинстве случаев форма частиц не является геометрически правильной или вообще определенной, из-за чего ставится под сомнение возможность применения к ним контактно-дискретной модели деформационного уплотнения. Гораздо более предпочтительным в таких случаях является применение сжимаемой континуальной модели с реологической характеристикой (пределом текучести), определяющей сопротивление металла деформированию.

Модель пористого тела. Условие полной пластичности. Решение осесимметричной задачи теории прессования пористых тел предполагает определение локальных характеристик напряженного состояния прессовки по координатам, а также интегральных параметров: давления, усилия и работы деформации. В качестве модели пористого тела принимаем сплошное сжимаемое жесткопластическое тело с пределом текучести σ_s . Процесс прессования заготовки 1 производим в жесткой матрице 2, опирающейся на пружину 3 (рис. 1). Матрица 2 перемещается со скоростью верхнего пуансона 4, при этом нижний пуансон 5 остается неподвижным. Боковая поверхность прессовки, по форме представляющей собой тело вращения, в любой фиксированный

В пределе, когда плотность прессовки становится равной плотности компактного материала, то есть при $\delta = 1$, σ_r достигает значения σ_z (по аналогии с законом Паскаля для несжимаемых жидких сред).

Относительная плотность так же, как и путь деформирования или время, является общим переменным параметром процесса прессования, но для рассматриваемого фиксированного момента выступает в качестве константы при расчете напряженного состояния.

С учетом допущения (4), закона парности касательных напряжений $\tau_{rz} = \tau_{zr} = \tau$ и обозначения $\sigma_z = \sigma$ система уравнений (1)–(3) запишется следующим образом:

$$\delta \frac{\partial \sigma}{\partial r} + \frac{\partial \tau}{\partial z} = 0; \tag{5}$$

$$\frac{\partial \tau}{\partial r} + \frac{\partial \sigma}{\partial z} + \frac{\tau}{r} = 0; \tag{6}$$

$$(1 - \delta)^2 \sigma^2 + 3\tau^2 = \sigma_s^2. \tag{7}$$

Условие пластичности (7) устанавливает следующую взаимозависимость между компонентами тензора напряжений:

$$\sigma = \frac{1}{p} \sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}; \tag{7.1}$$

$$\tau = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2}. \tag{7.2}$$

Для последующих расчетов составим таблицу производных от этих выражений, используя известное в математике понятие взятия производной от неявно заданной функции. С учетом (5)

$$\sigma'_r = -\frac{3}{p} \frac{\tau \tau'_r}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} = -\frac{3\tau}{p^2 \sigma} \tau'_r = -\frac{\tau'_z}{\delta}; \tag{7.3}$$

$$\sigma'_z = -\frac{3}{p} \frac{\tau \tau'_z}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} = -\frac{3\tau}{p^2 \sigma} \tau'_z; \tag{7.4}$$

$$\tau'_r = -\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{p^2 \sigma \sigma'_r}{\sqrt{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2}}; \tag{7.5}$$

$$\tau'_z = -\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{p^2 \sigma \sigma'_z}{\sqrt{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2}} = -\delta \sigma'_r. \tag{7.6}$$

Здесь $\sigma(z, r)$, $\tau(z, r)$ – искомые напряжения (функции независимых координат z, r) при заданной относительной плотности прессовки δ .

Геометрическая интерпретация условия пластичности. Условие пластичности (7) геометрически интерпретируется как окружность радиусом σ_s , каждой точке которой соответствует напряженное состояние, вызывающее и поддерживающее пластическое течение металла. На рис. 3 оси σ, z повернуты на 90° , то есть условно показаны в плоскости номинального сечения (сечение перпендикулярное усилию прессования). Каждой точке очага деформации (допустим, это будет точка A с координатами z, r) соответствует искомый тензор напряжений σ, τ (точка B на окружности пластичности) с проекциями на оси напряжений $\sqrt{3}\tau$ и $p\sigma$. Углы прямоугольного

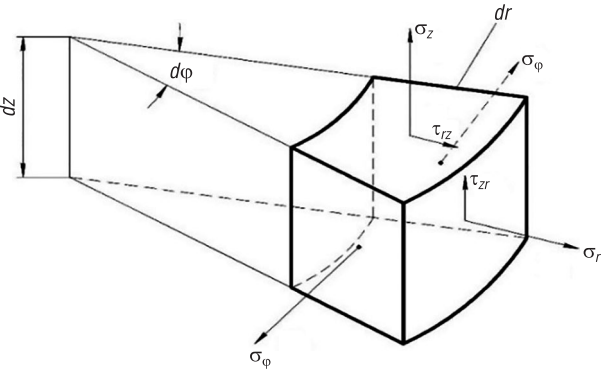


Рис. 2. Элементарный объем очага деформации с компонентами тензора напряжений

Fig. 2. Elemental volume of the deformation zone with components of the stress tensor

треугольника OBC (назовем его треугольником пластичности) определяются из следующих соотношений:

$$\alpha = \arcsin \frac{p\sigma}{\sigma_s}; \quad \beta = \arcsin \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s} = \operatorname{arctg} \frac{\sqrt{3}\tau}{p\sigma}; \quad \alpha + \beta = \frac{\pi}{2}. \quad (8)$$

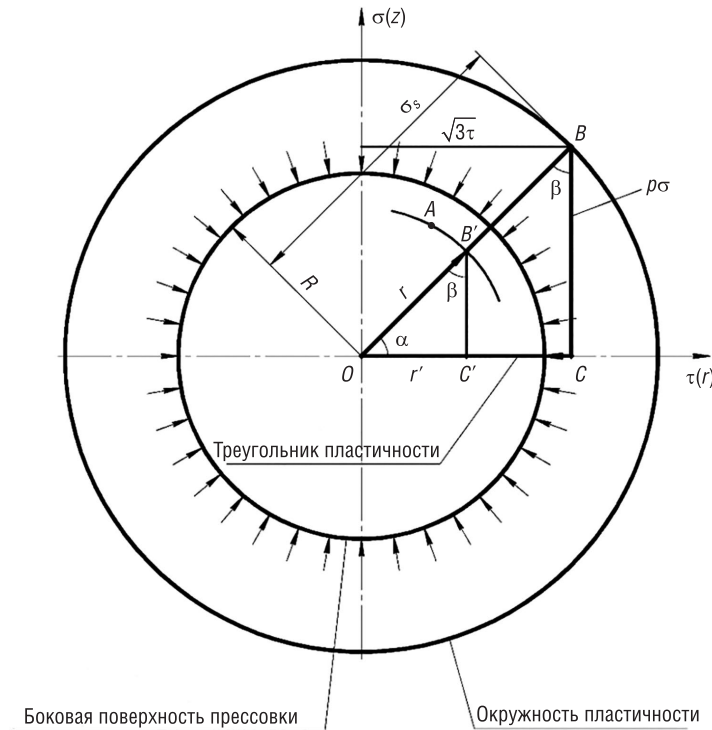


Рис. 3. Геометрическая интерпретация условия пластичности
Fig. 3. Geometric interpretation of plasticity condition

На оси симметрии z касательное напряжение τ равно нулю ($r = 0, \tau = 0$) по всей высоте прессовки при любой степени деформации сжатия. При этом нормальное напряжение σ согласно условию пластичности (7) имеет максимальное значение: $\sigma = \frac{1}{p}\sigma_s$. По мере удаления от оси z в радиальном направлении ($0 \leq r \leq R$) σ уменьшается, а τ возрастает. Эти параметры достигают своих экстремальных значений при $r = R$. Соответственно, угол α треугольника пластичности OBC изменяется в пределах от $\frac{\pi}{2}$ до 0, а угол β – от 0 до $\frac{\pi}{2}$. На боковой поверхности прессовки при $r = R$ в радиальном направлении есть напряжение, но нет деформации. По мере увеличения относительной плотности ($\delta_0 \leq \delta \leq 1$) $\sigma \rightarrow \infty$, в то время как τ не может превысить величины $\tau_{\max} = k = \frac{\sqrt{3}}{3}\sigma_s$.

Уравнение деформационного уплотнения. Для определения напряженного состояния пористого тела первое и второе слагаемые уравнения (6) представим в виде функции τ и ее производной τ'_z с использованием выражений (7.5), (7.3), (7.2), (7.1):

$$\tau'_r = -\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{p^2 \sigma \sigma'_r}{\sqrt{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2}} = \frac{p}{3\delta} \frac{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}}{\tau} \tau'_z.$$

Уравнение (6) запишем в виде

$$\frac{p}{3\delta} \frac{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}}{\tau} \frac{\partial \tau}{\partial z} - \frac{3}{p} \frac{\tau}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} \frac{\partial \tau}{\partial z} + \frac{\tau}{r} = 0.$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим:

$$\frac{p\sqrt{3}}{3\delta} \int \frac{\sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}\right)^2 - \tau^2}}{\tau^2} d\tau - \frac{\sqrt{3}}{p} \int \frac{d\tau}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}}\right)^2 - \tau^2}} + \frac{1}{r} \int dz = 0;$$

$$\frac{p}{3\delta} \frac{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}}{\tau} + \left(\frac{\sqrt{3}p}{3\delta} + \frac{\sqrt{3}}{p} \right) \arcsin \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s} - \frac{z}{r} = C,$$

или с учетом (7.1), (8)

$$\frac{\sigma}{\omega\tau} + \gamma\beta - \frac{z}{r} = C, \tag{9}$$

где $\gamma = \frac{\sqrt{3}p}{3\delta} + \frac{\sqrt{3}}{p}$; $\beta = \arcsin \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s}$; $\omega = \frac{3\delta}{p^2}$.

Постоянную интегрирования C найдем из начальных и граничных условий. В момент начала пластической деформации на поверхности контакта прессовки с верхним пуансоном, то есть при $z = h = H_0$, $r = R$, касательное напряжение достигает величины, равной константе пластичности: $\tau_{\max} = k = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s$. Как следует из условия (7), нормальное напряжение обращается в нуль: $\sigma = 0$. Таким образом,

$$C = \gamma \frac{\pi}{2} - \frac{H_0}{R}; \tag{10}$$

$$\frac{\sigma}{\omega\tau} + \gamma\beta - \frac{z}{r} = \gamma \frac{\pi}{2} - \frac{H_0}{R}. \tag{11}$$

Граничные условия удовлетворяются подстановкой в (11) значения $R = R(z)$. Для цилиндрической матрицы $R = \text{const}$, для конической $R = R_0 + z\text{tg}\alpha$, где R_0 – радиус матрицы у ее основания, α – угол наклона образующей конуса.

Уравнение (11) представляет собой уравнение деформационного уплотнения пористого тела, связывающее воедино все параметры процесса. Для определения напряжений σ и τ это уравнение необходимо решать совместно с условием пластичности (7), то есть подстановкой выражений (7.1), (7.2):

$$\frac{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}}{p\omega\tau} + \gamma\beta - \frac{z}{r} = \gamma \frac{\pi}{2} - \frac{H_0}{R}; \tag{12}$$

$$\frac{\sqrt{3}\sigma}{\omega\sqrt{\sigma_s^2 - p^2\sigma^2}} + \gamma\beta - \frac{z}{r} = \gamma \frac{\pi}{2} - \frac{H_0}{R}. \tag{13}$$

Уравнения (11)–(13) являются трансцендентными, функции $\sigma(z, r)$, $\tau(z, r)$ заданы в неявном виде. Их решение возможно лишь численным методом. Тем не менее эти уравнения представляют собой замкнутое решение осесимметричной задачи при условии пластичности Губера–Мизеса.

Частные выражения условия пластичности в уравнении деформационного уплотнения.

Первое слагаемое уравнения (6) представим в виде функции σ и ее производной σ'_z с использованием выражений (7.5), (7.3), (7.6):

$$\tau'_r = -\frac{\sqrt{3}}{3} \frac{p^2 \sigma \sigma'_r}{\sqrt{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2}} = \frac{\sqrt{3} p^2}{3\delta} \frac{\sigma \tau'_z}{\sqrt{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2}} = -\frac{p^4}{3\delta} \frac{\sigma^2 \sigma'_z}{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2}.$$

Уравнение (6) запишется в виде

$$-\frac{p^4}{3\delta} \frac{\sigma^2}{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2} \frac{d\sigma}{dz} + \frac{d\sigma}{dz} + \frac{\tau}{r} = 0.$$

Разделим левую и правую часть равенства на τ с подстановкой выражения (7.2):

$$-\frac{p^4}{3\delta} \frac{\sigma^2}{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2} \frac{1}{\tau} \frac{d\sigma}{dz} + \frac{1}{\tau} \frac{d\sigma}{dz} + \frac{1}{r} = 0;$$

$$-\frac{\sqrt{3}p}{3\delta} \frac{\sigma^2}{\left[\left(\frac{\sigma_s}{p}\right)^2 - \sigma^2\right]^{\frac{3}{2}}} \frac{d\sigma}{dz} + \frac{\sqrt{3}}{p} \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{p}\right)^2 - \sigma^2}} \frac{d\sigma}{dz} + \frac{1}{r} = 0.$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим:

$$-\frac{\sqrt{3}p}{3\delta} \int \frac{\sigma^2 d\sigma}{\left[\left(\frac{\sigma_s}{p}\right)^2 - \sigma^2\right]^{\frac{3}{2}}} + \frac{\sqrt{3}}{p} \int \frac{d\sigma}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{p}\right)^2 - \sigma^2}} + \int \frac{dz}{r} = 0;$$

$$-\frac{\sqrt{3}p}{3\delta} \left[\frac{\sigma}{\sqrt{\left(\frac{\sigma_s}{p}\right)^2 - \sigma^2}} - \arcsin \frac{p\sigma}{\sigma_s} \right] + \frac{\sqrt{3}}{p} \arcsin \frac{p\sigma}{\sigma_s} + \frac{z}{r} = C;$$

$$\left(\frac{\sqrt{3}p}{3\delta} + \frac{\sqrt{3}}{p} \right) \arcsin \frac{p\sigma}{\sigma_s} - \frac{\sqrt{3}p^2}{3\delta} \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma_s^2 - p^2 \sigma^2}} + \frac{z}{r} = C,$$

или с учетом (7.2), (8)

$$\gamma\alpha - \frac{\sigma}{\omega\tau} + \frac{z}{r} = C.$$

Постоянную интегрирования C , как и в предыдущем случае, найдем из начальных и граничных условий, то есть при $z = h = H_0$, $r = R$. В момент начала пластической деформации $\tau = k = \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s$, $\sigma = 0$, $C = H_0 / R$. Решение окончательно принимает следующий вид:

$$\gamma\alpha - \frac{\sigma}{\omega\tau} + \frac{z}{r} = \frac{H_0}{R}. \quad (14)$$

Сопоставляя уравнения (11), (14), приходим к выводу, что эти уравнения представляют собой одно и то же уравнение, выраженное в одном случае углом β (11), а во втором – углом α (14), (см. рис. 3). Если сложить их левые и правые части, то получим условие пластичности (7), выраженное углами α , β :

$$\arcsin \frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s} + \arcsin \frac{p\sigma}{\sigma_s} = \beta + \alpha = \frac{\pi}{2}.$$

Уравнение (14) можно получить также из уравнения (11) простой заменой угла β углом α : $\beta = \pi/2 - \alpha$.

Присутствие в уравнении деформационного уплотнения тригонометрических функций углов треугольника пластичности есть следствие того, что нормальное и касательное напряжения σ и τ жестко связаны между собой алгебраической зависимостью (7).

Изменение напряженного состояния прессовки в радиальном направлении. Второе слагаемое уравнения (6) представим в виде функции τ и ее производной τ'_r с использованием выражений (7.4), (7.3), (7.5):

$$\sigma'_z = -\frac{3}{p} \frac{\tau\tau'_z}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} = \frac{3\delta}{p} \frac{\tau\sigma'_r}{\sqrt{\sigma_s^2 - 3\tau^2}} = -\frac{9\delta\tau^2\tau'_r}{p^2(\sigma_s^2 - 3\tau^2)}.$$

Уравнение (6) запишем в виде

$$\frac{d\tau}{dr} - \frac{9\delta\tau^2}{p^2(\sigma_s^2 - 3\tau^2)} \frac{d\tau}{dr} + \frac{\tau}{r} = 0.$$

Разделяя переменные и интегрируя, получим:

$$\frac{d\tau}{\tau} - \frac{9\delta\tau d\tau}{p^2(\sigma_s^2 - 3\tau^2)} = -\frac{dr}{r};$$

$$\int \frac{d\tau}{\tau} + \frac{3\delta}{2p^2} \int \frac{d(\sigma_s^2 - 3\tau^2)}{\sigma_s^2 - 3\tau^2} = -\int \frac{dr}{r};$$

$$\ln \tau + \ln r + \frac{\omega}{2} \ln(\sigma_s^2 - 3\tau^2) = \ln C';$$

$$\tau(\sigma_s^2 - 3\tau^2)^{\frac{\omega}{2}} = C', \text{ или с учетом (7.1) } \tau\sigma^\omega r = \frac{C'}{p^\omega} = C.$$

Полученное выражение не содержит координату z , поэтому постоянную интегрирования C найдем из граничных условий при $r = R$:

$$C = \tau_R \sigma_R^\omega R.$$

Как будет показано далее, константы τ_R и σ_R для каждого рассматриваемого номинального сечения прессовки находятся из уравнения деформационного уплотнения (11) с учетом координаты z . Таким образом, равенство, демонстрирующее зависимость компонентов тензора напряжений от координаты r при вполне конкретном значении z , имеет вид

$$\tau\sigma^\omega = \tau_R \sigma_R^\omega \frac{R}{r}. \tag{15}$$

Из него следует несколько важных соотношений:

$$\sigma = \sigma_R \left(\frac{\tau_R R}{\tau r} \right)^{\frac{1}{\omega}}; \tau = \tau_R \left(\frac{\sigma_R}{\sigma} \right)^\omega \frac{R}{r}; \frac{\sigma}{\tau} = \frac{\sigma_R}{\tau_R} \left(\frac{\sigma}{\sigma_R} \right)^\omega \left(\frac{\tau_R R}{\tau r} \right)^{\frac{1}{\omega}} \frac{r}{R}.$$

Анализ уравнения (15) показывает, что изменение напряженного состояния пористого тела в радиальном направлении подчинено гиперболическому закону с отклонениями, вызванными пористостью и сжимаемостью материала.

Определение напряжений по координатам точек очага деформации. Решение трансцендентных уравнений. Для определения напряжений σ и τ с помощью простейших формул воспользуемся особенностями осесимметричного нагружения. Для этого вновь обратимся к рис. 3. Номинальное сечение прессовки так же, как и круг пластичности, имеет форму круга радиусом R . Рассматриваемая точка A лежит на окружности радиусом r . Пересечение последней с диагональю OB треугольника пластичности OBC дает точку B' , которая имеет те же координаты z, r и находится в том же напряженном состоянии, что и точка A . Проекция радиуса r (OB') на ось r (совпадает с осью напряжений τ) дает отрезок r' (OC') и образует координатный треугольник $OB'C'$. Прямоугольные треугольники OBC и $OB'C'$ с равными углами α, β геометрически подобны, следовательно

$$\frac{\sqrt{3}\tau}{\sigma_s} = \frac{r'}{r} = \sin \beta = \mu; \frac{p\sigma}{\sigma_s} = \frac{\sqrt{r^2 - (r')^2}}{r} = \sqrt{1 - \left(\frac{r'}{r}\right)^2} = \sqrt{1 - \mu^2} = \cos \beta;$$

$$\frac{\sigma}{\tau} = \frac{\sqrt{3}}{p \operatorname{tg} \beta} \approx \frac{\sqrt{3}}{p \beta}; \sigma = \frac{\sigma_s}{p} \sqrt{1 - \mu^2}; \tau = \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s. \tag{16}$$

Для расчета напряжений σ и τ по формулам (16) достаточно найти величины угла β и коэффициента μ . Подставим соотношение σ/τ из (16) в (11). После несложных преобразований получаем квадратный трехчлен, из которого определяется угол β , а затем и коэффициент μ :

$$a\beta^2 + b\beta + c = 0; \beta_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}, \quad (17)$$

где $a = \gamma\omega\rho$; $b = -K\omega\rho$; $c = \sqrt{3}$; $K = \gamma \frac{\pi}{2} - \frac{H_0}{R} + \frac{z}{r}$; $\mu = \sin \beta$.

Коэффициент μ является сложной функцией координат точек очага деформации, относительной плотности прессовки и предела текучести деформируемого металла при заданном температурно-скоростном режиме прессования.

Система уравнений (4), (16), (17) представляет собой замкнутое аналитическое решение исходной системы дифференциальных уравнений (5)–(7). Помимо расчета и анализа локальных характеристик напряженного состояния прессовки, эти уравнения позволяют определить интегральные параметры процесса прессования: давление, усилие и работу деформации.

Силовой расчет процесса прессования. Построение силовых диаграмм и определение работы деформации связано с определением среднеинтегральной величины давления на поверхности контакта прессовки с верхним пуансоном S при $z = h$, $R = R_k$. Среднее давление без учета сил контактного трения рассчитывается по формуле

$$\begin{aligned} q_i &= \frac{1}{S} \iint_S q_i(S) dS = \frac{1}{S} \iint_S (\sigma_z + \tau_{zr}) dS = \frac{1}{\pi R_k^2} \int_0^R \left(\frac{\sigma_s}{p} \sqrt{1-\mu^2} + \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \sigma_s \right) d\pi r^2 = \\ &= \frac{2\sigma_s}{R_k^2} \int_0^R \left(\frac{1}{p} \sqrt{1-\mu^2} + \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \right) r dr. \end{aligned} \quad (18)$$

По результатам численного интегрирования (18) строится диаграмма прессования $q_i(\delta)$ с учетом того, что $p = 1 - \delta$.

Здесь необходимо заметить, что пластическая деформация металла не наступает при нулевом значении среднего по площади контакта давления прессования. В начале процесса среднее давление имеет строго определенную величину, которая была учтена при определении начальных и граничных условий и которую можно рассчитать по формуле (18).

Формула для расчета усилия прессования имеет вид

$$P_i = q_i S = 2\pi\sigma_s \int_0^R \left(\frac{1}{p} \sqrt{1-\mu^2} + \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \right) r dr. \quad (19)$$

Влияние сил контактного трения. Силовые параметры процессов брикетирования сыпучих материалов в значительной степени зависят от трения боковой поверхности прессовки о стенку

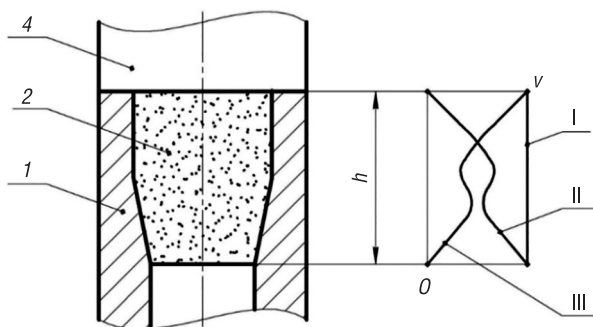


Рис. 4. Графики скоростей перемещения матрицы и прессуемого металла

Fig. 4. Graphs of the speeds of movement of the matrix and the pressed metal

матрицы, которое возникает при наличии их относительного перемещения. На рис. 4 показаны графики скоростей перемещения: I – матрицы 2 (скорость матрицы 2 равна скорости v перемещения верхнего пуансона 4), II – частиц металла I по высоте прессовки h , III – матрицы 2 относительно прессуемого металла I. Видно, что скорость частиц металла по высоте прессовки уменьшается от максимального значения v до нуля, то есть матрица, движущаяся с постоянной скоростью v , обгоняет прессуемый металл. Следовательно, результирующая сила бокового трения всегда направлена в сторону действующего усилия прессования, что свидетельствует об эффективности

технологической схемы, приводит к значительному снижению сопротивления деформированию и работы деформации (энергетических затрат).

Среднеинтегральная величина нормального бокового давления определяется следующим образом:

$$q_r = \frac{1}{h} \int_0^h [\sigma_r(z) + \tau_{rz}(z)] dz = \frac{1}{h} \int_0^h [\delta \sigma(z) + \tau(z)] dz = \frac{\sigma_s}{h} \int_0^h \left(\frac{\delta}{p} \sqrt{1-\mu^2} + \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \right) dz. \quad (20)$$

В соответствии с законом Амонтона–Кулона удельная сила трения прямо пропорциональна боковому давлению:

$$\tau = f q_r = \frac{\sigma_s f}{h} \int_0^h \left(\frac{\delta}{p} \sqrt{1-\mu^2} + \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \right) dz. \quad (21)$$

Сила бокового трения равна произведению удельной силы трения на площадь боковой контактной поверхности прессовки:

$$F = \tau S_r = 2\pi R \sigma_s f \int_0^h \left(\frac{\delta}{p} \sqrt{1-\mu^2} + \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \right) dz. \quad (22)$$

Усилие прессования пористого тела в подвижной матрице с учетом сил контактного трения рассчитывается по формуле

$$P = P_i - F = \sigma_s \left[2\pi \int_0^R \left(\frac{1}{p} \sqrt{1-\mu^2} + \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \right) r dr - 2\pi R f \int_0^h \left(\frac{\delta}{p} \sqrt{1-\mu^2} + \mu \frac{\sqrt{3}}{3} \right) dz \right]. \quad (23)$$

Путь деформирования и относительная плотность прессовки связаны между собой зависимостью: $\Delta h = (H_0 - H_k)/\delta$. Соответственно, выражения для определения текущего значения работы деформации и полной работы имеют вид

$$A = \int_0^{\Delta h} P(\Delta h) d(\Delta h) = \int_{\delta_0}^{\delta} P(\delta) d\delta; \quad (24)$$

$$A = \int_0^{H_0 - H_k} P(\Delta h) d(\Delta h) = \int_{\delta_0}^{\delta_k} P(\delta) d\delta. \quad (25)$$

Выводы

1. В результате применения континуальной модели к силовому расчету процесса прессования пористых тел получено замкнутое аналитическое решение осесимметричной задачи методом совместного решения дифференциальных уравнений равновесия и условия пластичности Губера–Мизеса. В силу того что задача решена применительно к телам вращения в общем виде и в общей постановке, само решение следует рассматривать как методологическое при любой схеме осесимметричного нагружения.

2. Получены уравнения деформационного уплотнения пористого тела как для идеального процесса прессования, так и с учетом сил контактного трения.

3. Разработан метод расчета локальных характеристик напряженного состояния прессовки по координатам очага пластической деформации и интегральных параметров процесса прессования: давления, усилия и работы деформации.

Обозначения, принятые в работе

- H_0 – начальная высота прессовки;
- H_k – конечная высота прессовки;
- h – текущее значение высоты прессовки;
- Δh – путь деформирования;
- R – радиус прессовки в заданном сечении z ;
- ρ – текущее значение плотности;

ρ_k – предельное значение плотности беспористого брикета;

$\delta = \frac{\rho}{\rho_k}$ – относительная плотность прессовки;

δ_0 – начальное значение относительной плотности;

δ_k – конечное значение относительной плотности;

$p = 1 - \delta$ – относительная пористость;

σ_s – предел текучести металла;

k – константа пластичности;

f – коэффициент трения

Список использованных источников

1. Хаар, А. К теории напряженных состояний в пластических и сыпучих средах / А. Хаар, Т. Карман // Теория пластичности: сб. ст. / [ред.: Ю. Н. Работнов]. – М., 1948. – С. 41–56.
2. Ивлев, Д. Д. Об общих уравнениях теории идеальной пластичности и статике сыпучей среды / Д. Д. Ивлев // Прикладная математика и механика. – 1958. – Т. 22, вып. 1. – С. 90–96.
3. Ивлев, Д. Д. Теория идеальной пластичности / Д. Д. Ивлев. – М.: Физматлит, 1966. – 232 с.
4. Роман, О. В. Теоретический анализ зависимости давления на стенки матрицы от плотности прессуемого материала / О. В. Роман, В. Е. Перельман // Порошковая металлургия: материалы IX Всесоюз. конф. по порошковой металлургии, май 1968 г. / Центр. и Латв. правл. НТО Машпрома [и др.]; [ред. В. С. Раковский]. – Рига, 1968. – С. 73–79.

References

1. Haar A., Karman T. On the theory of stress states in plastic and granular media. Rabotnov Yu. N. (ed.) *The Theory of Plasticity: Digest of Articles*. Moscow, 1948, pp. 41–56 (in Russian).
2. Ivlev D. D. On general equations of the theory of ideal plasticity and static of a flowing medium. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1958, vol. 22, iss. 1, pp. 119–128. [https://doi.org/10.1016/0021-8928\(58\)90087-X](https://doi.org/10.1016/0021-8928(58)90087-X)
3. Ivlev D. D. *The Theory of Ideal Plasticity*. Moscow, Fizmatlit Publ., 1966. 232 p. (in Russian).
4. Roman O. V., Perel'man V. E. Theoretical analysis of the pressure dependence on the walls of the matrix from the density of the pressed material. *Poroshkovaya metallurgiya. Materialy IX vsesoyuznoi konferentsii po poroshkovoy metallurgii, May, 1968* [Powder Metallurgy: Materials of the IX All-Union. Conference Powder Metallurgy, May 1968]. Riga, 1968, pp. 73–79 (in Russian).

Информация об авторе

Дьяконов Олег Михайлович – доктор технических наук, профессор, кафедра порошковой металлургии, сварки и технологии материалов, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: deaconco@mail.ru

Information about the author

Oleg M. Dyakonov – D. Sc. (Engineering), Professor, Department of the Powder Metallurgy, Welding and Technology of Materials, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: deaconco@mail.ru

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

УДК 621.565.943.2
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-215-223>

Поступила в редакцию 16.02.2020
Received 16.02.2020

**М. В. Гуреев¹, И. И. Хабибуллин^{1,2}, А. Н. Скрыпник¹, Г. С. Маршалова^{3,4}, И. А. Попов¹,
Р. Г. Кадыров¹, В. М. Гуреев¹, А. Д. Чорный³, Ю. В. Жукова³**

¹Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ,
Казань, Российская Федерация

²АО «НИИТурбокомпрессор имени В. Б. Шнеппа», Казань, Российская Федерация

³Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск,
Республика Беларусь

⁴Белорусский государственный технологический университет, Минск, Республика Беларусь

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНЫХ КОМПОНОВОЧНЫХ РЕШЕНИЙ
ДЛЯ АППАРАТА ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАСЛА
СИСТЕМ СМАЗКИ КОМПРЕССОРНЫХ УСТАНОВОК
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ФИЗИЧЕСКОГО
И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Аннотация. С помощью методов численного моделирования исследованы тепло- и гидравлические параметры аппаратов воздушного охлаждения масла (АВОМ) при изменении геометрии проточной части для снижения аэродинамического сопротивления воздушного тракта АВОМ и повышения эффективности охлаждения масла. Для этого на основе методов численного моделирования конвективного теплообмена разработана и апробирована методика расчетов, применимая к широкому классу теплообменных аппаратов, в том числе состоящих из секций оребренных плоских труб, полученных методом экструзии с последующей обработкой методом деформирующего резания. Отличительной особенностью методики является представление оребренной части теплопередающей поверхности в виде пористых вставок. Разработанная методика позволяет уменьшить требования к оборудованию для численного моделирования и снизить время расчетов. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами эксперимента; их анализ показывает, что тепловая мощность маслоохладителя вследствие выявленных конструктивных недостатков воздушного тракта АВОМ на 19 % меньше проектного значения. На основе численных исследований выработан ряд рекомендаций по дальнейшему совершенствованию компоновочных решений для аппарата воздушного охлаждения масла с целью повышения его тепловой эффективности и аэродинамического совершенства. В частности, предложено установить новые лопасти вентиляторов для повышения их производительности; изменить конструкцию выходного воздушного клапана (жалюзи), исключив перегородку, частично затеняющую проходное сечение нижнего вентилятора; изменить форму нижнего коллектора маслоохладителя с целью обеспечения равномерного профиля скорости на входе в охлаждающие секции. Перспективным техническим решением, приводящим к увеличению общей производительности маслоохладителя, может быть последовательная схема подключения теплообменных секций. Эффективность всех предложенных технических решений может быть оценена с помощью методов численного моделирования, без создания дорогостоящей пилотной установки.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения, маслоохладитель, гидравлические потери, коэффициент конвективного теплообмена, численное моделирование

Для цитирования: Определение рациональных компоновочных решений для аппарата воздушного охлаждения масла систем смазки компрессорных установок с использованием методов физического и численного моделирования / М. В. Гуреев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 215–223. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-215-223>

Mikhail V. Gureev¹, Ilmir I. Khabibullin^{1,2}, Artyom N. Skrypnik¹, Galina S. Marshalova^{3,4}, Igor A. Popov¹,
Ruslan G. Kadyrov¹, Viktor M. Gureev¹, Andrei D. Chorny³, Yuliya V. Zhukova³

¹Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI, Kazan, Russian Federation

²JSC “NIIturbokompressor named after V. B. Schnepf”, Kazan, Russian Federation

³A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

⁴Belarusian State Technological University, Minsk, Republic of Belarus

USE OF EXPERIMENTAL AND NUMERICAL SIMULATION METHODS FOR RATIONAL DESIGN OF THE AIR COOLING APPARATUS FOR LUBRICATION SYSTEMS OF COMPRESSORS

Abstract. The objective of the present work was to study heat and hydraulic parameters of an air cooling apparatus of oil (ACAO), whose geometry of its flow-through part is changed to decrease hydraulic losses in its air conduit and to increase the cooling efficiency of oil. Using numerical simulation methods of heat transfer, we have developed and tested the computational techniques applied in a wide class of heat exchange apparatuses, including those consisting of the sections of finned flat tubes manufactured by extrusion with subsequent deforming cutting. We have proposed to make a finned part of a heat-exchange surface in the form of porous inserts. This has allowed us to reduce numerical simulation equipment requirements and to decrease computational time. Predicted results well agree with experimental data; their analysis shows that the calculated value of thermal performance of the oil cooler due to the revealed construction drawbacks of the air conduit is by 19 % less than that of the designed one. Based on the results of the numerical simulation studies, a number of recommendations have been made how to improve the layout inside the air cooling apparatus for oil in order to enhance its thermal performance and aerodynamic quality. In particular, we have proposed to mount new fan blades to enhance its performance; to change the construction of the air outlet valve by taking away a baffle that partially overshadows the exit area of the bottom fan; to modify the shape of the bottom collector of the oil cooler in order to make a uniform velocity profile at the entrance of cooling sections. Connecting in series heat exchange sections may be a perspective engineering decision. The outcomes of all proposed engineering decisions can be assessed by numerical simulation methods that will allow us not to design expensive equipment.

Keywords: air cooling apparatus, oil coolant, hydraulic losses, convective heat transfer coefficient, numerical simulation

For citation: Gureev M. V., Khabibullin I. I., Skrypnik A. N., Marshalova G. S., Popov I. A., Kadyrov R. G., Gureev V. M., Chorny A. D., Zhukova Y. V. Use of experimental and numerical simulation methods for rational design of the air cooling apparatus for lubrication systems of compressors. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 215–223 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-215-223>

Введение. К современному теплотехнологическому оборудованию предъявляются повышенные требования по компактности и эффективности [1]. Повышая эффективность за счет применения методов интенсификации теплообмена, а также развивая поверхность теплообмена ресурсосберегающими методами (например, методом деформирующего резания), можно снизить металлоемкость и, как следствие, стоимость теплообменного оборудования при сохранении мощности или массогабаритных характеристик [2].

Аппараты воздушного охлаждения (АВО) используются на объектах по транспортировке и переработке природного газа, в системах оборотного водоснабжения электростанций, нефтеперерабатывающих заводах, нефтехимических комплексах и т.д. Объем мирового рынка АВО различного типа (вентиляторные, башенные, грунтовые и т.д.) оценивался в 1,2 млрд долларов США в 2018 г. и, как ожидается, увеличится в среднем на 10,8 % с 2019 по 2025 г. В настоящее время только в России эксплуатируется около 52 тыс. АВО с установленной мощностью привода вентиляторов порядка 2,1–106,0 кВт.

Для эффективной работы винтовые и поршневые компрессоры используют масло определенной вязкости и консистенции, которые зависят от его температуры. При недостаточном охлаждении масла в компрессоре может начаться процесс его разложения, что негативно скажется на работоспособности компрессорного оборудования вплоть до выхода его из строя. Для уменьшения затрат на ремонт холодильных компрессоров следует правильно спроектировать масляный контур. Стандартный масляный контур компрессорного оборудования любой конструкции включает в себя систему контроля температуры масла, поэтому если температура выше установленной, то масло направляется в охладитель; если ниже, то поступает в блок компрессора.

Постановка задачи. В патенте Российской Федерации на полезную модель №190872 «Аппарат воздушного охлаждения масла» (авторы – Р.М. Низамутдинов, И.И. Хабибуллин, Р.Г. Кадыров) предложена конструкция аппарата, предназначенного для охлаждения масла, циркулирующего в системе смазки компрессорных установок и газоперекачивающих агрегатов, функционирующих в условиях низких температур. Конструкция позволяет обеспечить рав-

номерный прогрев охлаждающих секций маслоохладителя аппарата воздушного охлаждения масла (АВОМ) за счет повышения эффективности процесса внутренней рециркуляции как на стадии обеспечения предпусковых условий, так и в режиме работы АВОМ при низких температурах окружающего воздуха (рис. 1).

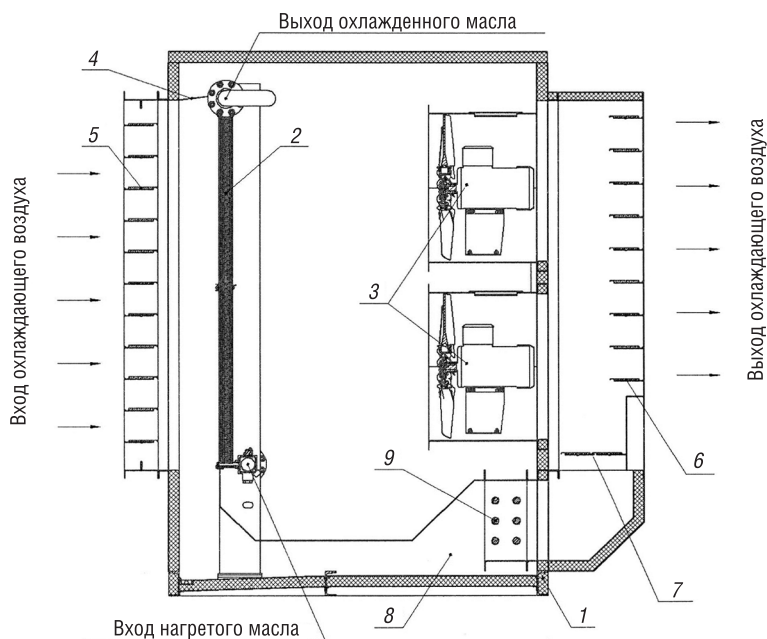


Рис. 1. Аппарат воздушного охлаждения масла: 1 – корпус, 2 – маслоохладитель с теплообменными секциями, 3 – осевые вентиляторы с электроприводами, 4 – направляющая перегородка, 5–7 – управляемые клапаны, 8 – канал рециркуляции, 9 – электронагреватель

Fig. 1. Oil air cooling apparatus: 1 – body, 2 – heat exchange oil cooler, 3 – axial fans with electric drives, 4 – baffle, 5–7 – controllable valves, 8 – recirculation channel, 9 – electric heater

Маслоохладитель для предлагаемого АВОМ предполагается изготавливать с использованием оребренных плоских теплообменных труб из алюминиевого сплава, получаемых методами экструзии и деформирующего резания. Схема и внешний вид пилотного образца теплообменной секции представлены на рис. 2.



Рис. 2. Поперечное (a), продольное (b) сечение и внешний вид (c, d) теплообменной секции

Fig. 2. Transverse (a), longitudinal (b) cross-sections and heat transfer section design (c, d)

В [3–5] на основе экспериментального исследования и сравнительного анализа по различным критериям эффективности обоснован и произведен выбор рациональных геометрических параметров образцов теплообменной секции АВО на основе данных теплообменных труб, обеспечивающих при фиксированных энергозатратах привода АВОМ снижение массогабаритных параметров теплообменной секции.

В последнее время при проектировании технических устройств в дополнение к инженерным подходам все чаще используются современные методы вычислительной гидрогазодинамики (Computational Fluid Dynamics – CFD). Применение методов численного моделирования

позволяет не только проектировать технические устройства, в частности системы охлаждения, но и оптимизировать их отдельные узлы, а также детально оценивать влияние различных режимных и конструктивных параметров и выявлять рациональные с точки зрения теплогидравлической эффективности конструкции. Кроме того, использование указанных методов дает возможность снизить затраты, связанные с постановкой натуральных теплофизических экспериментов.

В [6] предложен метод расчета поверхности охлаждения радиатора, позволяющий, во-первых, оценить пористость пучка труб в радиаторе и, во-вторых, учесть в расчетных формулах неравномерность теплоотдачи по глубине сердцевины радиатора. Используя эти идеи, на основе методов численного моделирования конвективного теплообмена была разработана и апробирована методика расчетов [7], применимая к широкому классу теплообменных аппаратов, включая АВОМ. Отличительной особенностью методики является представление оребренной части теплопередающей поверхности в виде пористых вставок для исключения необходимости описания расчетной сеткой мелких пластин и ребер. Разработанная методика позволяет уменьшить требования к оборудованию для численного моделирования и снизить время расчетов.

Методами численного моделирования в [8–10] проведено исследование теплогидравлических характеристик АВОМ при заданных геометрических параметрах маслоохладителя и всей проточной части АВОМ. Однако полученные результаты недостаточны для оптимизации геометрических параметров рассматриваемой конструкции. *Целью представленной работы* является исследование методами численного моделирования тепло- и гидравлических параметров АВОМ при изменении геометрии проточной части для снижения аэродинамического сопротивления воздушного тракта АВОМ и повышения эффективности охлаждения масла.

Численное моделирование теплогидравлических характеристик ядра маслоохладителя и АВОМ. На первом этапе была проведена верификация расчетной модели и алгоритма численного решения с использованием экспериментальных данных [12]. Объектом, позволившим верифицировать расчетный алгоритм, являлась модель теплообменной матрицы (ядра) маслоохладителя АВОМ, сконструированная на основе одного из вариантов геометрии плоских оребренных теплообменных труб из алюминиевого сплава, получаемых методами экструзии и деформирующего резания [3]. Модель теплообменной матрицы (ядра) маслоохладителя АВОМ внешне омывалась потоком воздуха, внутри ее было реализовано течение масла. CAD-модель теплообменной матрицы (ядра) маслоохладителя АВОМ показана на рис. 3.

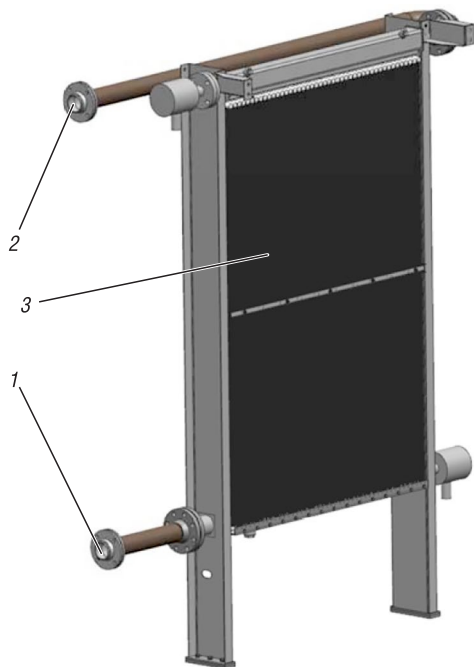


Рис. 3. CAD-модель теплообменной секции маслоохладителя аппарата воздушного охлаждения масла: 1 – подвод масла, 2 – отвод масла, 3 – оребренные плоские трубы

Fig. 3. CAD-model of the heat exchange section of the cooler of an air cooling apparatus of oil: 1 – oil input, 2 – oil output, 3 – finned flat tubes

Решались уравнения Навье–Стокса, осредненные по Рейнольдсу, уравнение неразрывности и уравнение энергии, сформулированное в терминах энтальпии. Для замыкания уравнений Рейнольдса была использована $k-\omega$ модель переноса сдвиговых напряжений Ментера в стандартной формулировке [12] совместно с пристеночной функцией Standart Scaleble, применение которой позволило получить результаты, наиболее близкие к экспериментальным данным.

В процессе решения сходимость задачи контролировалась уровнем погрешности. Для давления и скоростей минимальный уровень погрешности составлял 10^{-3} , для температуры – 10^{-5} . Расчеты прекращались по достижении погрешности для поправок давления 10^{-4} , для энтальпии (уравнение энергии) – 10^{-8} . Требуемая сходимость и установление постоянных значений основных интегральных параметров достигалась в пределах 1000 итераций.

В процессе решения сходимость задачи контролировалась уровнем погрешности. Для давления и скоростей минимальный уровень погрешности составлял 10^{-3} , для температуры – 10^{-5} . Расчеты прекращались по достижении погрешности для поправок давления 10^{-4} , для энтальпии (уравнение энергии) – 10^{-8} . Требуемая сходимость и установление постоянных значений основных интегральных параметров достигалась в пределах 1000 итераций.

Теплофизические свойства воздуха задавались: для плотности – согласно закону несжимаемого идеального

газа, для вязкості – согласно закону Сазерленда; для коэффициента теплопроводности – полиномиальной зависимостью от температуры. Теплофизические свойства масла – в виде кусочно-линейных зависимостей.

Задача решалась в сопряженной постановке. Задавались следующие граничные условия: среднemasовые расходы на входе в контур воздуха и в контур масла; условие нулевого среднеинтегрального давления на выходах из контуров воздуха и масла; коэффициенты пористости характерной части контура воздуха; коэффициенты проницаемости секции; температура на входе контур воздуха и в контур масла. Стенки корпуса АВОМ предполагались теплоизолированными. Для замыкания модели пористого тела применялись материалы исследований потерь давления и тепловой эффективности (мощности) ядра маслоохладителя от расхода в различных секциях [3]. В ядре теплообменника маслоохладителя для моделирования процесса теплопередачи между контурами внешнего воздуха и масла использовалась модель двойной ячейки. Для учета неравномерности распределения скорости теплоносителей на входе в ядро маслоохладителя из-за коллекторов была использована модель теплообменного аппарата двойной ячейки (dual cell heat exchanger model).

Результаты численного моделирования показали, что значения потерь полного давления по воздушному тракту выше экспериментальных на 4,2 %; по тракту масла – ниже экспериментальных на 1,3 %; оцененная в численном моделировании тепловая мощность оказалась ниже экспериментально полученной на 0,4 %, что позволяет считать разработанный подход корректным.

Для численного моделирования теплогидравлических характеристик всего блока АВОМ создана трехмерная CAD-модель, представленная на рис. 4.

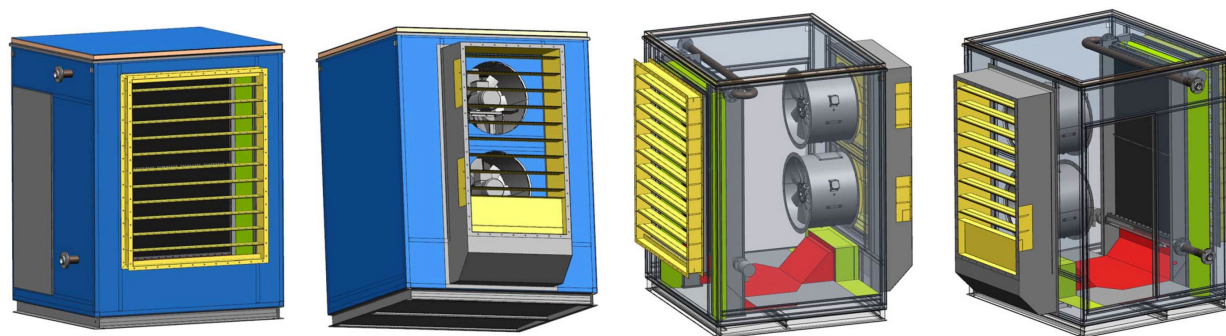


Рис. 4. CAD-модель элементов, входящих в состав аппарата воздушного охлаждения масла

Fig. 4. CAD-model of air cooling apparatus of oil elements

С целью исключения влияния граничных условий на гидродинамические, газодинамические и тепловые процессы в блоке охлаждения (рис. 5, *a*) расчетная модель была дополнена входной и выходной областями.

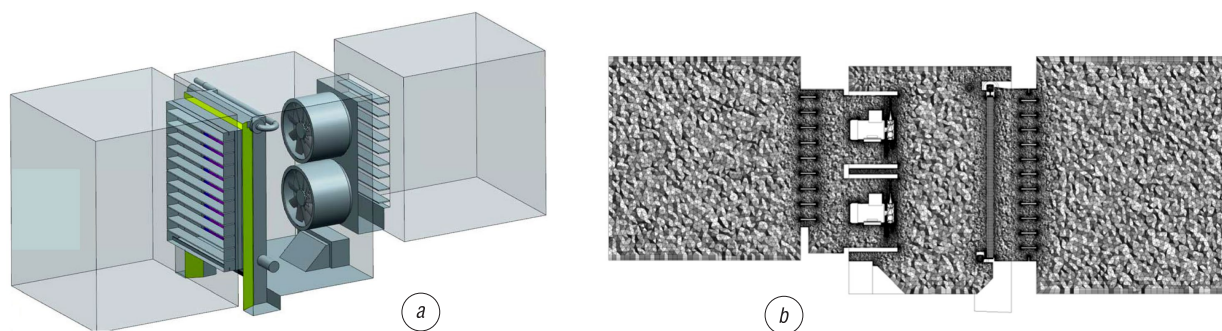


Рис. 5. CAD-модель элементов аппарата воздушного охлаждения масла с дополнительными входной и выходной областями (*a*) и фрагмент расчетной сетки (*b*)

Fig. 5. CAD-model of the elements of air cooling apparatus of oil with additional inlet and outlet computational domains (*a*) and the computational grid fragment (*b*)

Для создания расчетной сетки блока охлаждения (блока маслоохладителя) использовался генератор сеток ANSYS Meshing. Вращение вентиляторов имитировалось вращающейся локальной системой координат. Итоговая конечно-объемная сетка состояла из ~20 млн тетрагексагональных и гибридных элементов (рис. 5, *b*). Максимальный размер ячейки поверхностной сетки был равен 10 мм; максимальный размер объемной ячейки – 10 мм, минимальный – 1 мм. Для корректного описания всех особенностей геометрии элементов блока маслоохладителя при разработке расчетной сетки применялась опция локального сгущения. Для описания пограничного слоя потока воздуха в пристеночных областях генерировался пятиуровневый слой, состоящий из призматических ячеек, с коэффициентом роста 1,2.

Обсуждение полученных результатов. Результаты численного моделирования показали [9], что часть потока воздуха равномерно проходит через маслоохладитель, далее направляется в зону вентиляторов, образуя застойные зоны в нижней и верхней задней частях АВОМ (выделены черным овалом, рис. 6, *a*). Эти застойные зоны вносят незначительный вклад в потери давления по воздушному тракту. Распределение скорости по высоте маслоохладителя имеет однородный характер, за исключением участка, расположенного в нижней части маслоохладителя (рис. 6, *b*), формируя в этой области значения скорости ниже среднего из-за влияния формы и расположения нижнего коллектора. Неравномерное распределение скорости воздуха по высоте маслоохладителя (рис. 6, *c*) приводит к неравномерности распределения температуры в АВОМ (рис. 6, *d*). Результаты численного моделирования показали, что тепловая мощность маслоохладителя вследствие выявленных конструктивных недостатков воздушного тракта АВОМ на 19 % меньше проектного значения.

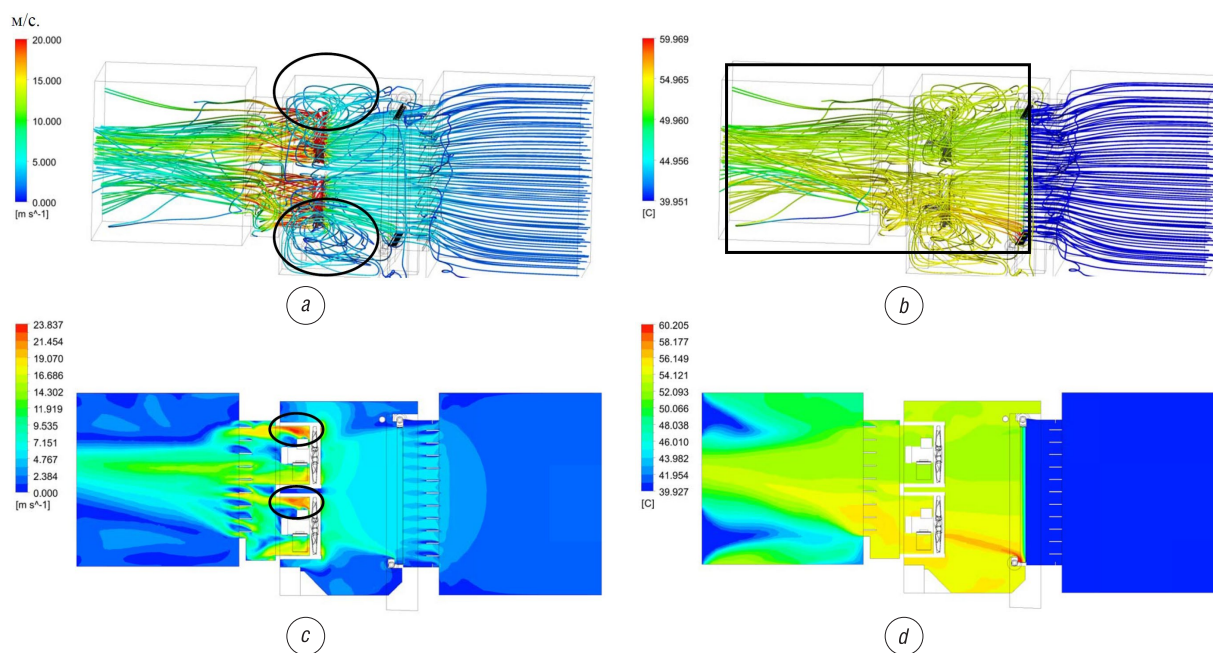


Рис. 6. Линии тока (*a*), изотермы (*b*), поле скоростей (*c*) и поле температур (*d*) в воздушном тракте аппарата воздушного охлаждения масла

Fig. 6. Streamlines (*a*), isotherms (*b*), velocity (*c*) and temperature (*d*) in the air conduit of air cooling apparatus of oil

Исходя из полученных результатов численного исследования, с целью повышения эффективности было рекомендовано установить маслоохладитель с большей теплопередающей поверхностью. Для повышения эффективности АВОМ предложено параллельно подключить две теплообменные секции (ядра) маслоохладителя в составе аппарата. Чтобы изменить геометрию АВОМ, нами проведено численное исследование его теплогидравлических характеристик. Однако полученные результаты показали, что данное техническое решение не дает требуемого результата: тепловая мощность маслоохладителя вследствие выявленных конструктивных недостатков воздушного тракта АВОМ на 10,6 % меньше проектного значения.

Однако использование методов численного моделирования для анализа эффективности функционирования АВОМ позволило сформулировать ряд рекомендаций по изменению воздушного тракта АВОМ и наметить пути для перспективных исследований. В частности, предложено установить новые лопасти вентиляторов для повышения их производительности; изменить конструкцию выходного воздушного клапана (жалюзи), исключив перегородку, частично затекающую проходное сечение нижнего вентилятора; изменить форму нижнего коллектора маслоохладителя с целью обеспечения равномерного профиля скорости на входе в охлаждающие секции. Перспективным техническим решением, приводящим к увеличению общей производительности маслоохладителя, может быть последовательная схема подключения теплообменных секций (ядер). Недостатком этого решения является увеличение гидравлических потерь в масляном тракте и, как следствие, снижение расхода теплоносителя через масляный насос.

Заключение. На основе методов численного моделирования конвективного теплообмена разработана и апробирована методика расчетов, применимая к широкому классу теплообменных аппаратов, в том числе состоящих из секций оребренных плоских труб, полученных методом экструзии с последующей обработкой методом деформирующего резания. Отличительной особенностью методики является представление оребренной части теплопередающей поверхности в виде пористых вставок. Разработанная методика позволяет уменьшить требования к оборудованию для численного моделирования и снизить время расчетов. Результаты численного моделирования хорошо согласуются с результатами эксперимента.

Проведенные численные исследования теплогидравлических характеристик АВОМ показали несоответствие проектным значениям по тепловой мощности и выявили причины этого несоответствия. Предложено техническое решение для другой компоновки маслоохладителя в АВОМ.

При параллельном подключении к АВОМ двух секций маслоохладителей результаты численного моделирования теплогидравлических характеристик показали несоответствие проектным значениям по тепловой мощности.

На основе численных исследований разработан ряд рекомендаций по дальнейшему совершенствованию компоновочных решений АВОМ для повышения его тепловой эффективности и аэродинамического совершенства.

Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 19-58-04006) и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (гранты T19PM-076 и F18P-035).

Acknowledgements

The present work was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project No 19-58-04006) and by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (projects T19RM-076 and F18R-035).

Список использованных источников

1. Попов, И. А. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена: интенсификация теплообмена / И. А. Попов, Х. М. Махьянов, В. М. Гуреев; под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. – Казань: Центр инновационных технологий, 2009. – 560 с.
2. Перспективные методы интенсификации теплообмена для теплоэнергетического оборудования / И. А. Попов [и др.] // Энергетика Татарстана. – 2011. – № 1. – С. 25–29.
3. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла / С. В. Тиунов [и др.] // Вестн. Казан. гос. техн. ун-та им. А. Н. Туполева. – 2019. – Т. 75, № 3. – С. 10–15.
4. Скрыпник, А. Н. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла / А. Н. Скрыпник // Труды XXIV Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения». – Казань: изд-во ИП А. Р. Сагиева. – 2019. – Т. 2. – С. 277–281.
5. Экспериментальное исследование характеристик оребренных плоских труб / Г. С. Маршалова [и др.] // Будущее машиностроения России: тр. 12-й Всерос. конф. молодых ученых и специалистов с междунар. участием. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. – С. 532–536.
6. Якубович, А. И. К вопросу расчета поверхности охлаждения многорядных радиаторов тракторов «Беларус» / А. И. Якубович, В. Е. Тарасенко // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2010. – № 2. – С. 49–58.
7. Маршалова, Г. С. Использование методов численного моделирования для расчета радиатора охлаждения транспортных средств / Г. С. Маршалова, Т. А. Баранова, А. Д. Чорный // Труды XXIV Международной молодежной научной конференции «Туполевские чтения». – Казань: изд-во ИП А. Р. Сагиева. – 2019. – Т. 2. – С. 252–256.

8. Хабибуллин, И. И. Интенсификация теплообмена в аппаратах воздушного охлаждения / И. И. Хабибуллин, Р. М. Низамутдинов, Р. Г. Кадыров // Вестн. Казан. гос. техн. ун-та им. А. Н. Туполева. – 2018. – Т. 74, №4. – С. 55–60.
9. Аппараты воздушного охлаждения масла для компрессорных установок. Повышение эффективности / Р. Г. Кадыров [и др.] // Компрессорная техника и пневматика. – 2019. – № 1. – С. 35–42.
10. Численное моделирование процессов теплообмена в аппарате воздушного охлаждения масла / И. И. Хабибуллин [и др.] // Газовая пром-сть. – 2019. – №2. – С. 84–90.
11. Экспериментальное исследование теплогидравлических характеристик оребренных плоских труб аппарата воздушного охлаждения масла / С. В. Тиунов [и др.] // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2020. – Т. 63, №2. – С. 138–151. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-138-150>
12. Menter, F. R. Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows / F. R. Menter // 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference, 1993. – № 2906. – P. 1–21. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>.

References

1. Popov I. A., Makhyanov Kh. M., Gureyev V. M. Gortyshov Yu. F. (ed.) *Physical Basis and Industrial Application of Heat Transfer Enhancement: in 'Heat Transfer Enhancement'*. Kazan, Tsentr innovatsionnykh tekhnologii Publ., 2009. 560 p. (in Russian).
2. Popov I. A., Yakovlev A. B., Schelchikov A. V., Ryzhkov D. V., Obukhova L. A. Promising methods of heat transfer enhancement for heat power equipment. *Energetika Tatarstana* [Energy of Tatarstan], 2011, no. 1, pp. 25–29 (in Russian).
3. Tiunov S. V., Skrypnik A. N., Marshalova G. S., Gureev V. M., Popov I. A. Experimental study of thermal-hydraulic performance of finned heat exchanger flat pipes for oil air-cooler. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni A. N. Tupoleva = Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva*, 2019, vol. 75, no. 3, pp. 10–15 (in Russian).
4. Skrypnik A. N. Experimental study of the thermohydraulic characteristics of finned flat tubes of an oil-air cooler. *Trudy XXIV Mezhdunarodnoj molodozhnoj nauchnoj konferentsii "Tupolevskie chteniya"*. T. 2 [Proceedings of the 24th International Youth Scientific Conference "Tupolevskie chteniya". Vol. 2]. Kazan, 2019, pp. 277–281 (in Russian).
5. Marshalova G. S., Popov I. A., Skrypnik A. N., Tiunov S. V. Experimental study of the characteristics of finned flat tubes. *Budushcheye mashinostroyeniya Rossii: trudy 12-i Vserossiyskoi konferentsii molodykh uchenykh i spetsialistov s mezhdunarodnym uchastiyem* [The Future of Russian Engineering: Proceedings of the 12th All-Russian Conference of Young Scientists and Specialists with International Participation]. Moscow, Bauman Publishing House, 2019, pp. 532–536 (in Russian).
6. Yakubovich A. I., Tarasenko V. E. On the issue of calculating the cooling surface of multi-row radiators of tractor "Belarus". *Vestnik GGTU imeni P. O. Sukhogo* [Bulletin of the Sukhoi State Technical University of Gomel], 2010, no. 2, pp. 49–58 (in Russian).
7. Marshalova G. S., Baranova T. A., Chorny A. D. Using of numerical simulation methods to calculate the cooling radiator for vehicles. *Trudy XXIV Mezhdunarodnoi molodozhnoi nauchnoi konferentsii "Tupolevskie chteniya"*. T. 2 [Proceedings of the 24th International Youth Scientific Conference "Tupolevskie chteniya". Vol. 2]. Kazan, 2019, pp. 252–256 (in Russian).
8. Habibullin I. I., Nizamutdinov R. M., Kadyrov R. G. Heat and mass transfer enhancement in air coolers. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni A. N. Tupoleva* [Vestnik KGTU im. A. N. Tupoleva], 2018, vol. 74, no. 4, pp. 55–60 (in Russian).
9. Kadyrov R. G., Habibullin I. I., Nizamutdinov R. M., Parandin Yu. A. Oil-air coolers for compressors. Efficiency enhancement. *Kompressorная техника и пневматика = Compressors and Pneumatics*, 2019, no. 1, pp. 35–42 (in Russian).
10. Habibullin I. I., Nizamutdinov R. M., Kadyrov R. G., Nikolaenko I. V., Gureev M. V., Tiunov S. V. Numerical simulation of heat transfer processes in an oil-air cooler. *Gazovaya promyshlennost' = Gas Industry*, 2019, no. 2, pp. 84–90 (in Russian).
11. Tiunov S. V., Skrypnik A. N., Marshalova G. S., Gureev V. M., Popov I. A., Kadyrov R. G., Chorny A. D., Zhukova Yu. V. Experimental study of the thermohydraulic characteristics of finned flat tubes of an oil-air cooler. *Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*, 2020, vol. 63, no. 2, pp. 138–151 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-2-138-150>
12. Menter F. R. Zonal two equation k-w turbulence models for aerodynamic flows. *23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference*, 1993, no. 2906, pp. 1–21. <https://doi.org/10.2514/6.1993-2906>

Информация об авторах

Гуреев Михаил Викторович – научный сотрудник, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). E-mail: gureev.mv@gmail.com

Хабибуллин Ильмир Ильдарович – кандидат технических наук, ведущий инженер, АО «НИИтурбокомпрессор имени В. Б. Шнеппа» (Сибирский тракт, 40, 420029, Казань, Российская Федерация); Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). E-mail: rim3li490@mail.ru

Information about the authors

Mikhail V. Gureev – Research Associate, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). E-mail: gureev.mv@gmail.com

Ilmir I. Khabibullin – Ph. D. (Engineering), Leading Engineer, JSC "NII turbokompressor named after V. B. Schnepp" (40, Siberian Tract, 420029, Kazan, Russian Federation); Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). E-mail: rim3li490@mail.ru

Скрыпник Артем Николаевич – аспирант, ассистент, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). E-mail: anskrypnik@kai.ru

Маршалова Галина Сергеевна – кандидат технических наук, ассистент, Белорусский государственный технологический университет (ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь); научный сотрудник лаборатории турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: galiana.sidorik@gmail.com

Попов Игорь Александрович – член-корреспондент Академии наук Республики Татарстан, доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1700-7896>

Кадыров Руслан Газинурович – аспирант, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). E-mail: adres.krg@mail.ru

Гуреев Виктор Михайлович – доктор технических наук, профессор, Казанский национальный исследовательский технический университет имени А. Н. Туполева – КАИ (ул. К. Маркса, 10, 420111, Казань, Российская Федерация). E-mail: viktor.gureev@kai.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1229-8417>

Чорный Андрей Дмитриевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: anchor@hmti.ac.by. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>

Жукова Юлия Владимировна – кандидат физико-математических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, лаборатория турбулентности, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: julia_zhukova@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1219-6373>

Artyom N. Skrypnik – Postgraduate Student, Assistant, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). E-mail: anskrypnik@kai.ru

Galina S. Marshalova – Ph. D. (Engineering), Junior Researcher, Belarusian State Technological University (13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus); Scientific Researcher, Laboratory of Turbulence, 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: galiana.sidorik@gmail.com

Igor A. Popov – Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan, D. Sc. (Engineering), Professor, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). E-mail: popov-igor-alex@yandex.ru. <https://orcid.org/0000-0002-1700-7896>

Ruslan G. Kadyrov – Postgraduate Student, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). E-mail: adres.krg@mail.ru

Viktor M. Gureev – D. Sc. (Engineering), Professor, Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev – KAI (10, K. Marx Str., 420111, Kazan, Russian Federation). E-mail: viktor.gureev@kai.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1229-8417>

Andrei D. Chorny – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory of Turbulence, 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: anchor@hmti.ac.by. <https://orcid.org/0000-0003-4716-6123>

Yuliya V. Zhukova – Ph. D. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of Turbulence, 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: julia_zhukova@rambler.ru. <https://orcid.org/0000-0003-1219-6373>

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ
К 55-летию Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси**

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS
*On the 55th Anniversary of the Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny
of the National Academy of Sciences of Belarus*

УДК 536.24.001.57:621.039.517.55

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-224-234>

Поступила в редакцию 23.07.2019

Received 23.07.2019

Д. Л. Третинников, А. В. Дойникова, П. К. Нагула

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь*

**МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ В ЗАЩИТНОЙ
ОБОЛОЧКЕ АЭС С ВОДО-ВОДЯНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ РЕАКТОРОМ**

Аннотация. Представлены результаты расчетного моделирования развития аварии в защитной оболочке АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1000 с помощью программного средства COCOSYS. В качестве объекта исследования рассматривалась защитная оболочка Балаковской АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1000/В-320. Приведены результаты расчета параметров среды в защитной оболочке в условиях запроектной аварии с «большой» течью из первого контура при следующих исходных событиях: разрыв главного циркуляционного трубопровода Ду850 полным сечением на входе в реактор с одновременным отказом всех источников переменного тока, включая дизель-генераторы на длительный период, без вмешательства оперативного персонала. Выполнено сравнение полученных результатов с аналогичными расчетами, проведенными с помощью аттестованного Ростехнадзором программного средства АНГАР, которое используется российскими специалистами. Результаты расчетов по обоим программным средствам хорошо согласуются: аварийный режим развивается по подобным сценариям, максимальное отклонение абсолютных величин давления составляет менее 10 %. Сделан вывод, что программное средство COCOSYS позволяет проводить расчетную оценку процессов, протекающих в защитной оболочке реактора при аварийных режимах на АЭС, и может быть использовано для независимой оценки обоснования безопасности АЭС, требуемой нормами МАГАТЭ.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, атомная электростанция, защитная оболочка, реакторная установка, водо-водяной энергетический реактор

Для цитирования: Третинников, Д. Л. Моделирование аварийных процессов, протекающих в защитной оболочке АЭС с водо-водяным энергетическим реактором / Д. Л. Третинников, А. В. Дойникова, П. К. Нагула // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 224–234. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-224-234>

Denis L. Tretinnikov, Anastasiya V. Doinikova, Petr K. Nagula

Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

**MODELING THE EMERGENCY PROCESSES PROCEEDING IN THE CONTAINMENT OF NPP WITH
WATER-WATER ENERGY REACTOR**

Abstract. The article presents the results of computational modeling of the development of accidents in the containment of NPP with water-water energy reactor (WWER) using the COCOSYS software. The containment of the Balakovo NPP with WWER-1000/V-320 was selected as the object of study. The results of the calculation of environmental parameters in the containment during a beyond design basis accident with a “large” leak from the primary circuit at the following initial events:

break of the main circulation pipeline DN850 with a full cross section at the reactor inlet, with simultaneous failure of all AC sources including diesel generators for a long period, without operating personnel intervention. A comparison of the results of calculations with the results obtained using the ANGAR software certified by Rostekhnadzor is performed. The calculation results are in good agreement: emergency scenarios are similar; the maximum deviation from absolute pressure values is less than 10 %. Thus, it was concluded that the analysis of processes occurring in the NPP containment during an accident can be performed using the COCOSYS code. This software can be used to independent safety assessment of NPP required by the IAEA standards.

Keywords: computer simulation, nuclear power plant, containment, reactor unit, water-water energetic reactor

For citation: Tretinnikov D. L., Doinikova A. V., Nagula P. K. Modeling the emergency processes proceeding in the containment of NPP with water-water energy reactor. *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. 2, pp. 224–234 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-224-234>

Введение. Безопасность атомной электростанции (АЭС) обеспечивается за счет последовательной реализации глубокоэшелонированной защиты, основанной на применении системы физических барьеров на пути распространения ионизирующего излучения и радиоактивных веществ в окружающую среду. Последним барьером безопасности энергоблока АЭС на пути распространения радиоактивных продуктов является защитная оболочка (ЗО). Она представляет собой массивное сооружение особой конструкции, в котором располагается основное оборудование реакторной установки АЭС. Назначение ЗО – не допустить выхода радиоактивности во внешнюю среду в случае максимальной проектной аварии, ограничить выбросы в случае запроектных аварий (ЗПА), а также оградить оборудование и внутренние конструкции здания реактора от возможных внешних воздействий.

В соответствии с требованиями НП-001-15 (Общие положения обеспечения безопасности атомных станций) и НП-082-07 (Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций) в проекте АЭС должен быть представлен анализ безопасности при проектных авариях (ПА) и ЗПА, включая тяжелые аварии с расплавлением активной зоны. В частности, требуется указать перечень таких аварий, сформулировать приемочные критерии, характеризующие уровень безопасности реакторной установки по отношению к каждой такой аварии, и обосновать выполнение этих критериев. Основные требования для ЗО АЭС при ПА и ЗПА сформулированы в НП-010-16 (Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций):

в проекте АС (атомной станции) должно быть обосновано, что максимальное значение избыточного давления (разрежения) среды в пространстве, ограниченном ГО (герметичным ограждением), при проектных авариях не превысит проектного давления (разрежения). Должно быть также обосновано не превышение значения проектной температуры при проектных авариях;

проектом АС должны быть предусмотрены и обоснованы технические и организационные меры по ограничению значения утечки из защитной оболочки при запроектных авариях. Указанные меры должны быть направлены на ограничение давления и температуры среды в объеме зоны локализации аварии, на предотвращение детонации взрывоопасных смесей, на защиту ГО от динамических струй, летящих предметов, а также на ограничение выбросов радиоактивных веществ в окружающую среду. Контролируемый выброс радиоактивных веществ за пределы ГО реакторной установки допускается при тяжелых авариях только в целях предотвращения разрушения ГО при условии принятия мер по обеспечению радиационной безопасности населения (посредством осуществления фильтрации выброса радиоактивных веществ, укрытия, эвакуации или иных мер).

В документе МАГАТЭ NS-G-1.2 (Оценка безопасности и независимая проверка для атомных электростанций. Руководство по безопасности) определено, что при анализе безопасности АЭС следует использовать соответствующие компьютерные коды по теплогидравлике. Для расчета параметров внутри защитных оболочек при ПА и ЗПА российскими специалистами – проектировщиками АЭС с водо-водяным энергетическим реактором (ВВЭР) используются следующие компьютерные программные средства (ПС) [1]: ПС «КУПОЛ-М» (разработчик – Государственный научный центр РФ «Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского»); ПС «АНГАР» (разработчик – АО «Атомэнергопроект»).

Данные программные средства аттестованы Ростехнадзором (программа КУПОЛ-М, аттестационный паспорт программного средства № 397 от 14.06.2016; программа АНГАР, аттестационный паспорт программного средства № 296 от 29.09.2011) для проведения расчетов изменения во времени температуры, давления, концентраций компонентов парогазовой среды в каждом помещении ЗО с учетом работы спринклерной системы, системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ), систем аварийного удаления водорода, систем вентиляции и предохранительных клапанов.

При экспертизе документов в обоснование безопасности АЭС в соответствии с требованиями норм МАГАТЭ SSG-2 (Детерминистический анализ безопасности атомных электростанций), NS-R-1 (Безопасность атомных электростанций: проектирование) должна выполняться независимая оценка обоснования безопасности АЭС отдельными экспертами или группами специалистов, не связанными с проектировщиками. Расчетное обоснование безопасности следует проводить программными средствами, отличными от применяемых проектировщиками АЭС.

В настоящее время в Республике Беларусь строится атомная электрическая станция проекта АЭС-2006 с реакторной установкой (РУ) типа ВВЭР-1200 модели В-491. Организацией, выполняющей научное сопровождение работ по строительству Белорусской АЭС, является научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны», коллективом которого ведутся работы по обоснованию безопасности АЭС. С этой целью используются различные программные средства, в том числе COCOSYS.

Целью работы являлось выполнение расчетного моделирования развития аварии в защитной оболочке АЭС с РУ ВВЭР с помощью программного средства COCOSYS и сравнение результатов расчетов параметров среды в ЗО с результатами, полученными с использованием кода, применяемого российскими специалистами. Эта работа была проведена, чтобы продемонстрировать возможность использования ПС COCOSYS для независимой оценки обоснования безопасности АЭС, требуемой нормами МАГАТЭ. В качестве объекта исследования рассматривалась защитная оболочка Балаковской АЭС с РУ ВВЭР-1000/В-320. Был выполнен расчет параметров среды в ЗО при запроектной аварии с «большой» течью из первого контура при следующих исходных событиях: разрыв главного циркуляционного трубопровода (ГЦТ) Ду850 полным сечением на входе в реактор с одновременным отказом всех источников переменного тока, включая дизель-генераторы на длительный период. Проведено сравнение результатов расчетов с аналогичными результатами, полученными с использованием кода АНГАР [2].

Описание кода программного средства COCOSYS. Программный код COCOSYS (Containment Code System) разрабатывается Обществом по безопасности ядерных реакторов и установок (Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit (GRS), Кельн, Германия). В 2010 г. разработана версия COCOSYS v2.4 (COCOSYS V2.4. User's Manual, Revision 1).

ПС COCOSYS [3] является теплогидравлическим реалистическим кодом, который основан на современных детерминистических моделях и дает возможность моделировать все физические процессы, протекающие в защитной оболочке легководного ядерного реактора в ходе аварийных процессов. Реализованные в компьютерном коде математические модели позволяют учитывать взаимное влияние моделируемых процессов.

Программный код COCOSYS v2.4 состоит из нескольких компьютерных программ – программных модулей (ПМ), каждый из которых обеспечивает моделирование некоторой части всей совокупности рассматриваемых процессов.

Основные модули, образующие ПС COCOSYS:

ТНУ (Thermal Hydraulic) – головной теплогидравлический модуль, который моделирует термогидродинамические процессы в ЗО, распространение газовой фазы, распределение давлений в помещениях, горение водорода, поведение систем безопасности и т. д.;

AFP (Aerosol-Fission Product) – модуль, моделирующий поведение аэрозолей и продуктов деления;

CCI (Core Concrete Interaction) – модуль, моделирующий взаимодействие остатков активной зоны с бетоном.

Связь между модулями осуществляется через параллельную виртуальную машину PVM 94 (Parallel Virtual Machine), которая обеспечивает функционирование всей модульной системы.

Версия ПС СОСОСЫС v2.4 официально передана в распоряжение специалистов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси немецкими разработчиками (GRS) в рамках международной программы VE/RA/07 «Развитие технического сотрудничества в области ядерной безопасности».

Защитная оболочка Балаковской АЭС с РУ ВВЭР-1000. Защитная герметичная оболочка представляет собой цилиндрическую конструкцию внутренним диаметром 45 м, соединенную с плоским днищем и перекрытую куполообразным верхом (рис. 1). Верхняя отметка купола – 66,65 м [4–6].

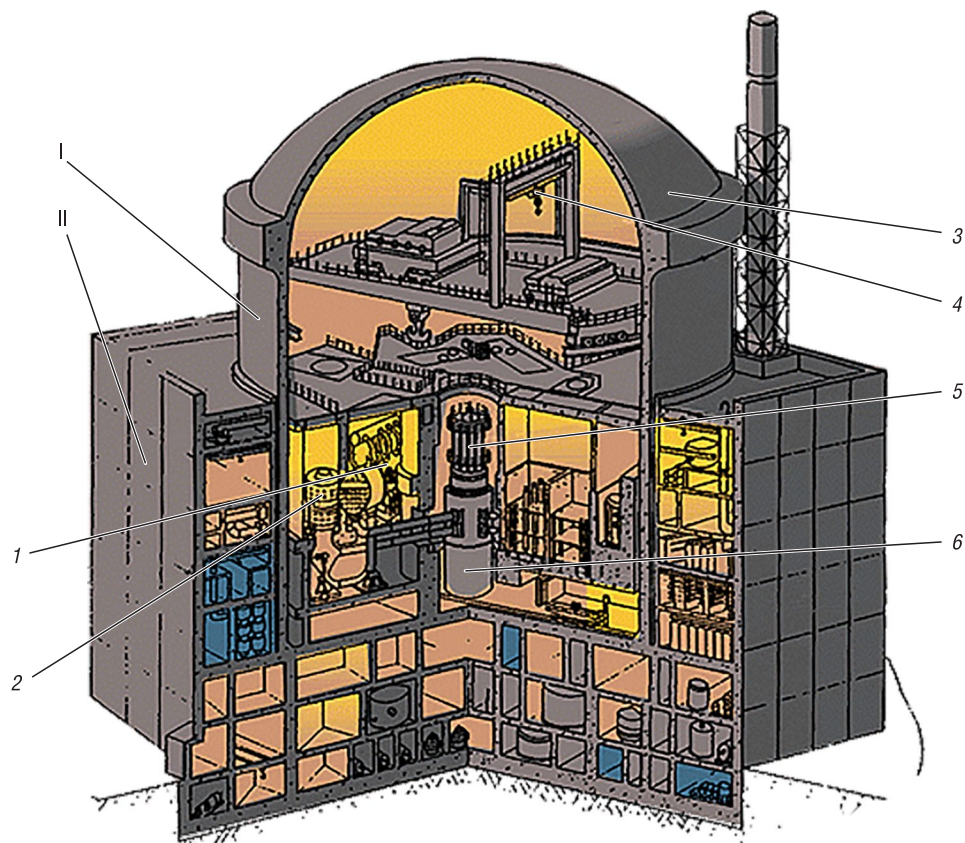


Рис. 1. Здание реактора Балаковской АЭС с РУ ВВЭР-1000: I – защитная оболочка, II – обстройка реакторного отделения; 1 – парогенератор, 2 – главный циркуляционный насос (ГЦН), 3 – купол защитной оболочки, 4 – полярный кран, 5 – система управления и защиты (СУЗ) реактора, 6 – реактор

Fig. 1. Reactor building of the Balakovo NPP with reactor facility WWER-1000: I – containment, II – adjoining buildings of the reactor facility; 1 – steam generator, 2 – main circulation pump (MCP), 3 – containment dome, 4 – polar crane, 5 – reactor control and protection system (CPS), 6 – reactor

Толщина стен цилиндрической части равна 1,2 м, толщина стен полусферического купола – 1,1 м, стены выполнены из предварительно напряженного железобетона. Для обеспечения герметичности внутренняя поверхность оболочки облицована углеродистой сталью СтЗсп5 толщиной 8 мм. Основные характеристики защитной оболочки АЭС с РУ ВВЭР-1000 представлены в табл. 1.

Фундаментная часть ЗО на отметке 13,2 м перекрыта сплошной железобетонной герметичной плитой толщиной 2,4 м и размером 66 × 66 м в плане. Плита является опорной частью дна ЗО и вышестоящей части обстройки реакторного отделения.

Параллельно герметичной плите основания расположены три железобетонных перекрытия. Первое и второе служат для размещения оборудования и трубопроводов. Третье, основное, перекрытие ЗО на отметке 36,9 м служит основанием (полом) реакторного зала.

Т а б л и ц а 1. Характеристики защитной оболочки АЭС с РУ ВВЭР-1000 [7]

T a b l e 1. Characteristics of the WWER-1000 type NPP Containment [7]

Параметр	Значение
Свободный объем, м ³	63 226,8
Свободный объем за вычетом объема жидкости в баке аварийного запаса бора и бассейна выдержки (БВ), м ³	62 167,8
Давление в защитной оболочке при нормальной эксплуатации, МПа	0,08–0,103
Температура в защитной оболочке при нормальной эксплуатации, К (°С)	288–333 (10–60)
Влажность в защитной оболочке при нормальной эксплуатации, %	До 90
Проектное давление, МПа	0,49
Проектная температура, К (°С)	423 (150)
Проектное разрежение, МПа	0,02
Величина утечки из защитной оболочки при проектном давлении, % свободного объема в день	0,1075

В центре защитной оболочки от герметичной плиты до основного перекрытия находится железобетонный ствол шахты реактора внутренним диаметром 6 м и толщиной 3 м. По разные стороны от шахты реактора расположены два парогенераторных бокса, бассейн выдержки отработанного ядерного топлива находится относительно реактора диаметрально противоположно бассейну с двумя шахтами ревизии внутри-корпусных устройств.

Т а б л и ц а 2. Свойства конструкционных материалов ЗО АЭС с РУ ВВЭР-1000

T a b l e 2. Thermal properties of the WWER-1000 type NPP containment structural materials

Материал	Плотность, кг/м ³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Углеродистая сталь	7800	58	480
Нержавеющая сталь	7900	15	500
Полимерная краска	900	0,15	1550
Железобетон	2480	3,0	807
Предварительно напряженный бетон	2240	2,16	820

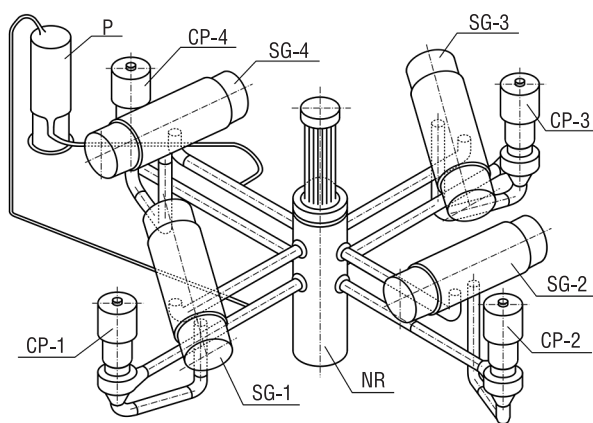


Рис. 2. Основное оборудование, расположенное под ЗО АЭС с РУ ВВЭР-1000 [7]: CP-1,2,3,4 – циркуляционные насосы; SG-1,2,3,4 – парогенераторы; NR – ядерный реактор; P – компенсатор давления

Fig. 2. Main equipment located inside the containment of the NPP with reactor facility WWER-1000 [7]: CP-1,2,3,4 – circulation pumps; SG-1,2,3,4 – steam generators; NR – nuclear reactor; P – pressurizer

Свойства основных конструкционных материалов защитной оболочки приведены в табл. 2. Общий вид основного оборудования, расположенного внутри ЗО, показан на рис. 2.

Модель защитной оболочки. Для моделирования защитной оболочки в ПС COCOSYS весь внутренний объем ЗО представляется произвольным количеством взаимосвязанных боксов (контрольных объемов), каждый из которых имеет несколько связей с другими боксами или с окружающей средой. Предполагается, что газокапельная среда в боксе идеально перемешана, то есть определяются средние параметры среды в каждом контрольном объеме.

Для дискретизации расчетной области (пространства ЗО) была выбрана схема нодализации с 34 расчетными объемами, представленная на рис. 3. Она содержит информацию об атмосферных и дренажных соединениях между контрольными объемами.

Реальные помещения внутри защитной оболочки моделируются 33 внутренними контрольными объемами, а пространство с наружной стороны защитной оболочки (окружающая среда ENV, см. рис. 3) – только одним контрольным объемом. Каждое помещение ЗО (см. табл. 2) представлено отдельным контрольным объемом. Подкупольное пространство разделено на восемь объемов (22–29 на рис. 3) для исследования возможного расслоения парогазовой среды. Общий объем ЗО задается равным 63 342 м³. При нормальной эксплуатации объемы 1 (бак аварийного запаса

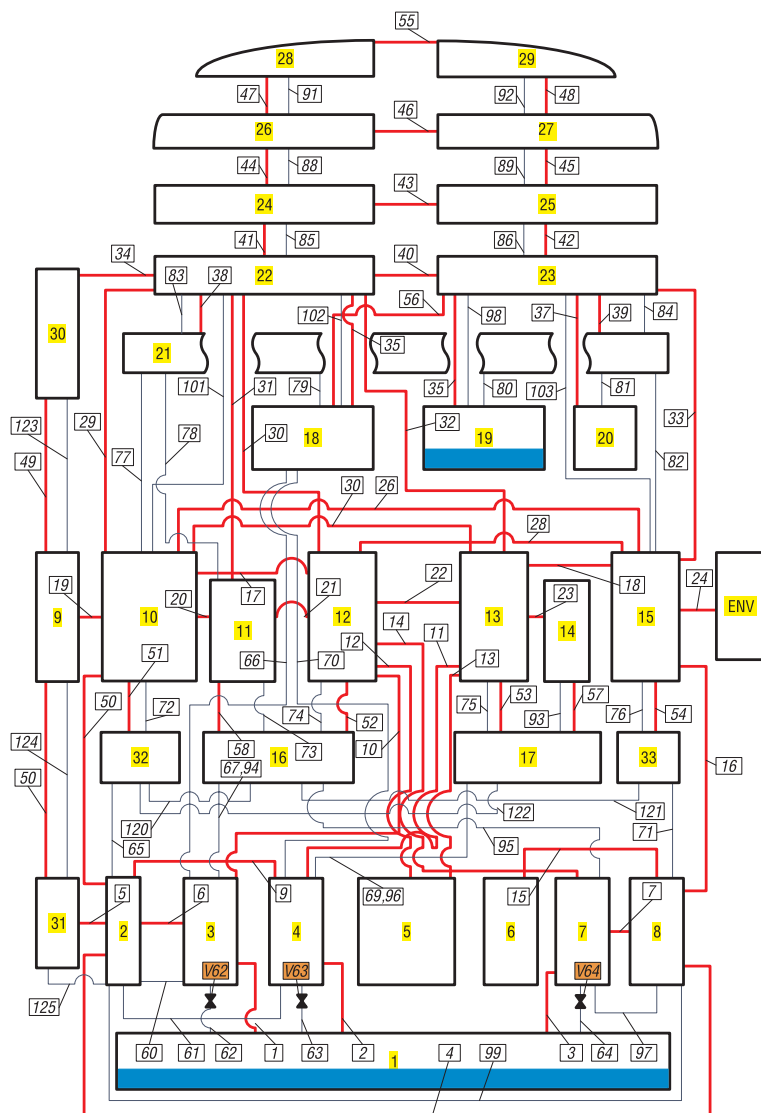


Рис. 3. Нодализационная схема защитной оболочки АЭС с РУ ВВЭР-1000
 Fig. 3. Nodalization scheme of the WWER-1000 type NPP containment

бора GA201) и 19 (бассейн выдержки GA401) заполнены водой на 632 м^3 (621 т) и 548 м^3 (539 т) соответственно. Следовательно, начальный свободный объем воздуха в 3О составляет $62\,162 \text{ м}^3$. При расчете свободных объемов каждого контрольного объема учитывалось затеснение помещений 3О от крупного оборудования, расположенного под 3О.

Контрольные объемы соединены 108 связями, через которые осуществляется перенос среды. 58 связей моделирует перенос газокapельной среды (атмосферные соединения). На рис. 3 атмосферные соединения показаны сплошными жирными линиями. Соединение 24 моделирует утечку из 3О в окружающую среду. Его площадь поперечного сечения задана такой, чтобы величина утечки составляла 0,1 % от свободного объема в сутки при проектном давлении. 50 связей моделируют перенос жидкой среды (дренажные соединения). На рис. 3 дренажные соединения показаны сплошными тонкими линиями. Соединения 62–64 оснащены запорными клапанами V62–V64 для того, чтобы избежать полного затопления объема 1 (в ПС COCOSYS полное затопление какого-либо объема приводит к сбою расчетов). Такое допущение в модели 3О является физически обоснованным, поскольку, когда бак аварийного запаса бора полон, конденсирующаяся жидкость из 3О в него больше не поступает и остается на полу отсеков 3, 4, 7 на высоте 13,7 м. Соединения 120–122 предназначены для моделирования потока жидкости между помещениями, расположенными на высотной отметке парогенераторных боксов (19,4 м), Соединения 60, 61 и 97 связывают помещения на отметке 13,7 м. Для этих соединений была реализована модель водосливного

баланса, которая определяет массовый расход жидкости через соединения и направление движения в зависимости от разницы между уровнями жидкости в соединенных помещениях.

Наружные и внутренние стены, перекрытия и металлоконструкции защитной оболочки, а также оборудование, расположенное внутри помещений, представлены 74 тепловыми структурами (теплообменными поверхностями), которые задаются как эквивалентные прямоугольные пластины, для моделирования накопления тепла оборудованием и внутренними стенами ЗО и теплопередачи через наружные стены окружающей среде.

Описанная модель защитной оболочки для расчетов аварийных режимов работы АЭС с РУ ВВЭР-1000/В-320 разработана совместно с немецкими специалистами (разработчиками ПС COCOSYS, GRS) в рамках международной программы BE/RA/07 «Развитие технического сотрудничества в области ядерной безопасности».

Описание выбранного сценария протекания аварии. Для проведения тестовых расчетов по описанной модели ЗО и сравнения результатов, полученных с помощью ПС COCOSYS, с результатами расчетов, выполненных с использованием ПС АНГАР, применяемого российскими проектировщиками АЭС с РУ ВВЭР, рассматривался сценарий тяжелой запроектной аварии, приведенный в [2, 7]. В указанных работах специалисты НИЦ «Курчатовский институт» и Института проблем безопасного развития атомной энергетики РАН проводили расчеты параметров парогазовой среды в ЗО Балаковской АЭС при аварии с разрывом ГЦТ Ду850 полным сечением на входе в реактор (см. рис. 2) с одновременным отказом всех источников переменного тока, включая дизель-генераторы на длительный период, без вмешательства оперативного персонала. Сценарий выбирался исходя из цели получения максимальных значений давления и температуры парогазовой среды в атмосфере ЗО, а также максимальной скорости образования и общего количества выделившегося водорода, в том числе с учетом внекорпусной стадии аварии и аварийных процессов в бассейне выдержки отработавшего топлива [2].

При рассмотрении аварии учитывалось влияние следующих процессов: истечение теплоносителя и выход водорода через гильотинный разрыв первого контура; выход газов при взаимодействии расплава активной зоны с бетоном подреакторной шахты; нагрев парогазовой среды в ЗО за счет энерговыделения продуктов деления (ПД).

Моделирование процессов в РУ при рассматриваемой аварии с целью определения выхода массы и энергии через гильотинный разрыв первого контура и при проплавлении днища корпуса реактора проводилось с использованием кода СОКРАТ В.1 [7]. Выход массы и энергии при взаимодействии расплава с бетоном подреакторной шахты получен с помощью модуля ГЕФЕСТ кода СОКРАТ В.1.

Рассчитанные с использованием кода СОКРАТ В.1 временные промежутки основных событий аварийного процесса от момента начала аварии до прекращения поступления расплава в подреакторную шахту представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Временные интервалы основных событий аварийного процесса [4, 10]

Table 3. Times of the main events of the accident scenario [4, 10]

Событие	Время, с
Начало аварии. Образование течи первого контура в «холодной» нитке ГЦТ, начало выбега ГЦН	0,0
Работа гидроемкости (ГЕ) САОЗ	5,5–54
Начало разогрева активной зоны	730
Разрыв оболочек твэл	1075–1310
Начало интенсивной генерации водорода в активной зоне	1185
Начало плавления оболочек твэл	1280
Начало перемещения расплавленных масс	1360
Полное осушение активной зоны	2420
Начало поступления материалов активной зоны в нижнюю камеру смешения (НКС)	3310
Выход кориума за пределы внутрикорпусной шахты	4150
Отказ корпуса реактора, начало поступления расплава в бетонную шахту	5830
Прекращение поступления расплава в бетонную шахту	9800

Масса воды и пара, вытекающих из контура в разрыв трубопровода, представлены на рис. 4 (кривая 1 – вода, кривая 2 – пар). За первые 10 с аварии в течь выбрасывается ~200 т воды. За период времени от начала истечения до отказа корпуса реактора в течь выходит 326 т воды и 81 т пара. Расчетная масса выделившегося водорода составляет 483 кг. Водород начинает присутствовать в паре, выходящем в течь, на 20-й минуте моделируемой аварии. Выход основной массы водорода происходит в течение 40 мин со средним по этому периоду темпом выхода 0,2 кг/с. В отдельные же интервалы времени, по протяженности не превышающие нескольких секунд, имеет место увеличение темпа выхода водорода до 2 кг/с. Масса водорода, вышедшего в течь, представлена на рис. 5.

После того как расплав поступает в подреакторную шахту, начинается его взаимодействие с бетоном, в результате чего в ЗО поступает пар, водород и окись углерода. Динамика поступления пара, водорода и окиси углерода при взаимодействии расплава с бетоном представлены на рис. 6 (кривые 1–3 соответственно) [2].

Начальные и граничные условия для расчета. Начальные условия для всех помещений защитной оболочки следующие:

начальное давление во всех контрольных объемах – 0,1 МПа;

начальная температура во всех контрольных объемах – 333 К (60 °С);

начальная относительная влажность – 90 %;

начальный объем жидкости в объеме R1 (бак аварийного запаса бора) 621 м³ и в объеме R19 (БВ) 548 м³;

температура окружающей среды ЗО – 293 К (20 °С);

влажность окружающей среды ЗО – 70 %.

Граничные условия для рассматриваемой аварии:

истечение теплоносителя через разрыв первого контура происходит в бокс парогенераторов, которому соответствует контрольный объем 12 (см. рис. 3);

поступление водорода из реактора через разрыв первого контура в контрольный объем 12;

поступление водорода, оксида углерода и водяного пара в шахту реактора при взаимодействии расплава с бетоном задается в контрольный объем 5;

поступление водорода, образующегося при радиоллизе в приемке, задается в контрольный объем 1;

поступление водорода, образующегося при радиоллизе в БВ и за счет пароциркониевой реакции после начала оголения тепловыделяющей сборки в БВ, задается в контрольный объем 19.

Результаты расчетов. Изменение давления парогазовой среды в ЗО при рассматриваемой аварии представлено на рис. 7.

Основное влияние на ход кривой давления оказывают следующие события, происходящие в процессе протекания аварии:

первый пик давления и температуры среды в ЗО появляется вследствие образования течи первого контура и выброса большого количества парогазовой смеси через разрыв;

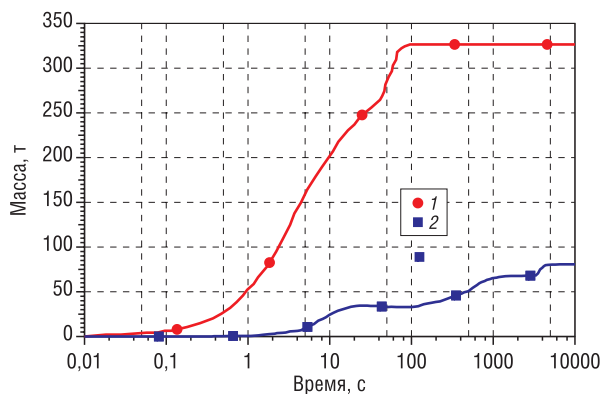


Рис. 4. Масса воды (кривая 1) и пара (кривая 2), выделившаяся через разрыв трубопровода полностью за определенный промежуток времени

Fig. 4. Integral mass of water (curve 1) and steam (curve 2) released from the break of the main circulation pipeline during the certain period of time

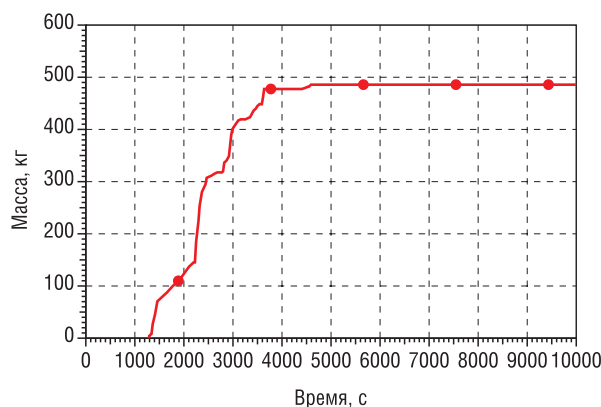


Рис. 5. Масса водорода, выделившаяся через разрыв за определенный промежуток времени

Fig. 5. Integral mass of hydrogen released from the break of the main circulation pipeline during the certain period of time

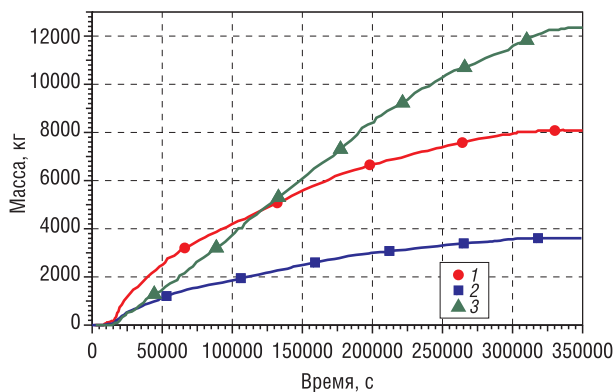


Рис. 6. Масса пара (кривая 1), образовавшегося за определенный промежуток времени в бетонной шахте в результате взаимодействия кориума с бетоном; масса водорода (кривая 2), выделившегося за определенный промежуток времени в бетонной шахте в результате окислительных реакций; масса окиси углерода (кривая 3), образовавшейся за определенный промежуток времени в бетонной шахте в результате взаимодействия кориума с бетоном

Fig. 6. Integral mass of steam (curve 1) formed during the certain period of time in the reactor cavity as a result of the interaction of corium with concrete; integral mass of hydrogen (curve 2) released during the certain period of time in the reactor cavity as a result of oxidative reactions; integral mass of carbon monoxide (curve 3) formed during the certain period of time in a reactor cavity as a result of the interaction of corium with concrete

второй пик давления образуется вследствие подачи охлаждающей жидкости в первый контур из ГЕ САОЗ;

через ~ 1 ч 40 м (6000 с) с момента начала аварии происходит проплавление днища корпуса реактора и начинается выход расплава в бетонную шахту. Взаимодействие расплава с бетоном сопровождается поступлением пара и неконденсируемых газов в ЗО;

через ~ 23 ч (82 800 с) с момента начала аварии начинается поступление в ЗО пара, образующегося при кипении воды в БВ, что приводит к повышению давления среды в ЗО.

На рис. 7 (а, б) представлены две кривые изменения давления в ЗО: черная штрихпунктирная линия – давление в ЗО, рассчитанное авторами [4] с помощью программного средства АНГАР; красная сплошная линия – давление в ЗО, рассчитанное с использованием ПС СОСОСЫС. Из рис. 7 видно, что результаты расчетов по обоим программным средствам хорошо согласуются: аварийный режим развивается по подобным сценариям, максимальное отклонение абсолютных величин давления составляет менее 10 %.

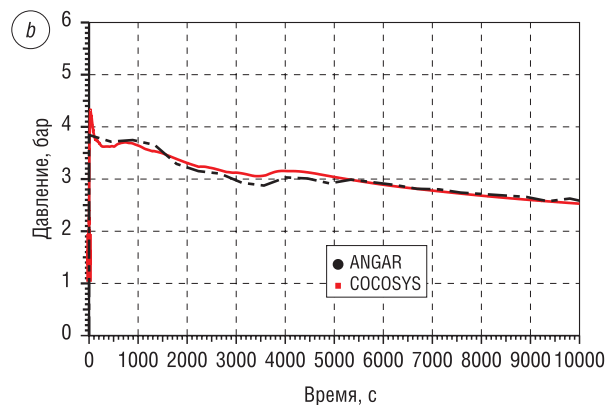
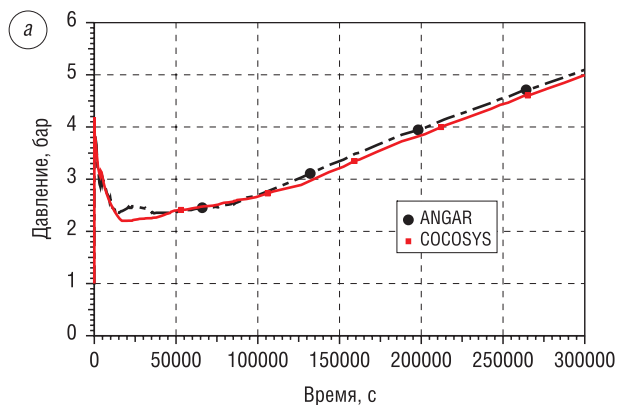


Рис. 7. Изменение во времени давления парогазовой среды в ЗО при аварии (а – 300 000 с, б – 10 000 с): красной сплошной линией обозначен расчет с помощью ПС СОСОСЫС, черной штрихпунктирной – ПС АНГАР

Fig. 7. Change in time of the pressure of the vapor-gas medium in the containment during an accident (а – 300 000 seconds, б – 10 000 seconds): the red solid line – calculated using the СОСОСЫС code, the black dash-dot line – calculated using the АНГАР code

Заключение. Разработана расчетная модель защитной оболочки АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1000/В-320 для программного средства СОСОСЫС. Проведены расчеты параметров среды в защитной оболочке при запроектной аварии с разрывом главного циркуляционного трубопровода Ду850 полным сечением с одновременным отказом всех источников переменного тока, включая дизель-генераторы на длительный период. Представлены и проанализированы результаты расчетов.

Показано сравнение полученных результатов с аналогичными расчетами, проведенными с помощью аттестованного Ростехнадзором программного средства АНГАР, которое используется проектировщиками (российскими специалистами) АЭС с РУ ВВЭР. Результаты расчетов по

обоим программным средствам хорошо согласуются. Таким образом, ПС СОСОСЫС позволяет проводить расчетную оценку процессов, протекающих в ЗО при аварийных режимах на АЭС, и может быть использовано для независимой оценки обоснования безопасности АЭС, требуемой нормами МАГАТЭ.

Список использованных источников

1. Кавун, О. Ю. Расчеты теплопередачи и гидродинамики, связанные нейтронно-физические и теплогидравлические расчеты, моделирование нестационарных и аварийных процессов / О. Ю. Кавун, С. Л. Соловьев, Р. А. Шевченко // Совет по аттестации программных средств при Ростехнадзоре 25 лет на службе безопасности: сб. публикаций. – М.: ФБУ «НТЦ ЯРБ», 2016. – 122 с.
2. Расчет параметров парогазовой среды в защитной оболочке ВВЭР-1000/В-320 при тяжелой запроектной аварии с учетом работы системы аварийного фильтруемого сброса газов [Электронный ресурс] / Ю. А. Звонарев [и др.] // Сборник трудов 9-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 19–22 мая 2015 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2015. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/article91-ru.htm> – Дата доступа: 25.04.2019.
3. Семенович, О. В. Контейментные коды: аналит. обзор / О. В. Семенович, А. Н. Тишкович, А. В. Дойникова. – Минск: НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны, 2017. – 35 с. – (Препринт ОИЭЯИ-72).
4. Основное оборудование реакторного отделения [Электронный ресурс] / М-во Рос. Федерации по атомной энергии, Концерн «Энергоатом», Балаковская атомная электростанция, Служба подготовки персонала. – Режим доступа: <http://bib.convdocs.org/v10948/?cc=1&view=pdf> – Дата доступа: 25.04.2019.
5. Технологические системы реакторного отделения. Ч. 1: Системы безопасности [Электронный ресурс] / М-во Рос. Федерации по атомной энергии, Концерн «Энергоатом», Балаковская атомная электростанция, Служба подготовки персонала. – Режим доступа: <http://bib.convdocs.org/v10948/?cc=2&view=pdf> – Дата доступа: 25.04.2019.
6. Технологические системы реакторного отделения. Ч. 2: Вспомогательные системы [Электронный ресурс] / М-во Рос. Федерации по атомной энергии, Концерн «Энергоатом», Балаковская атомная электростанция, Служба подготовки персонала. – Режим доступа: <http://bib.convdocs.org/v10948/?cc=3&view=pdf> – Дата доступа: 25.04.2019.
7. Моделирование поведения продуктов деления в защитной оболочке с помощью расчетного комплекса СОКРАТ [Электронный ресурс] / В. М. Алипченков [и др.] // Сборник трудов 7-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР», Подольск, 17–20 мая 2011 г. – Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2011. – Режим доступа: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2011/autorun/article42-ru.htm> – Дата доступа: 25.04.2019.

References

1. Kavun O. Yu., Soloviev S. L., Shevchenko R. A. Calculations of heat transfer and hydrodynamics, coupled neutron-physical and thermal-hydraulic calculations, simulation of non-stationary and emergency processes. *Sovet po attestatsii programnykh sredstv pri Rostekhnadzore 25 let na sluzhbe bezopasnosti: sbornik publikatsii* [Software Certification Council under Rostekhnadzor 25 years in the security service: collection of publications]. Moscow, SEC NRS, 2016. 122 p. (in Russian).
2. Zvonarev Yu. A., Budaev M. A., Kobzar V. L., Konobev A. V., Shmelkov Yu. B. Calculation of parameters of the vapor-gas medium in the containment of the WWER-1000/V-320 in a severe beyond design basis accident taking into account the operation of the system of emergency filtered gas discharge. *Sbornik trudov 9-y Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Obespecheniye bezopasnosti AES s VVER"* [Proc. of 9th Int. Scientific and Technical Conference "Safety of NPP with WWER"]. Podolsk, OKB "Gidropress", 2015. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2015/autorun/article91-ru.htm> (accessed 25 April 2019) (in Russian).
3. Semenovich O. V., Tishkovich A. N., Doinikova A. V. *Containment Codes: Analytical Review*. Preprint OIEYAI-72. Minsk, National Academy of Sciences of Belarus, JIPNR – Sosny, 2017. 35 p. (in Russian).
4. *The main equipment of the reactor department*. Available at: <http://www.bib.convdocs.org/v10948/?cc=1&view=pdf> (accessed 25 April 2019) (in Russian).
5. *Technological systems of the reactor compartment. Part 1. Security systems*. Available at: <http://www.bib.convdocs.org/v10948/?cc=2&view=pdf> (accessed 25 April 2019) (in Russian).
6. *Technological systems of the reactor compartment. Part 2. Auxiliary systems*. Available at: <http://www.bib.convdocs.org/v10948/?cc=3&view=pdf> (accessed 25 April 2019) (in Russian).
7. Alipchenkov V. M., Kiselev A. E., Tsaun S. V., Strizhov V. F., Tkachenko A. V., Konstantinov S. A., Maltsev M. B., Peresadko V. G., Kozlov D. I. Modeling the behavior of fission products in the containment using the SOKRAT computational complex. *Sbornik trudov 7-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Obespecheniye bezopasnosti AES s VVER"* [Proc. of the 7th Int. Scientific and Technical Conference "Safety of NPP with WWER"]. Podolsk, OKB "Gidropress", 2011. Available at: <http://www.gidropress.podolsk.ru/files/proceedings/mntk2011/autorun/article42-ru.htm> (accessed 25 April 2019) (in Russian).

Информация об авторах

Третинников Денис Леонидович – научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (р-н д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: trdl@list.ru

Дойникова Анастасия Вячеславовна – младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (р-н д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: sirius1991dav_asa@mail.ru

Нагула Петр Константинович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (р-н д. Прилесье, Луговослободской с/с, 47/22, 223063, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: nagulapk@mail.ru

Information about the authors

Denis L. Tretinnikov – Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (47/22 Prilesye district, Lugovaya Sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Belarus). E-mail: trdl@list.ru

Anastasiya V. Doinikova – Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus (47/22 Prilesye district, Lugovaya Sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Belarus). E-mail: sirius1991dav_asa@mail.ru

Petr K. Nagula – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (47/22 Prilesye district, Lugovaya Sloboda village council, Minsk district, 223063, Minsk region, Belarus). E-mail: nagulapk@mail.ru

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 539.16.04;539.169;589.166

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-235-242>

Поступила в редакцию 28.11.2019

Received 28.11.2019

И. А. Едчик, Т. Н. Корбут, А. В. Кузьмин, С. Э. Мазаник, В. П. Тогушов, М. О. Кравченко*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА РАЗМНОЖЕНИЯ НЕЙТРОНОВ
ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ «ЯЛИНА-ТЕПЛОВАЯ»**

Аннотация. Для изучения кинетики подкритических систем и определения оптимальных условий трансмутации долгоживущих радиоактивных продуктов деления в спектре ADS-систем (Accelerator Driven Subcritical System) в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны создана исследовательская ядерная установка (ИЯУ) «Ялина», включающая генератор нейтронов и две подкритические сборки: «Ялина-Тепловая» с тепловым спектром нейтронов и «Ялина-Бустер» – с быстрым. Представлены исследования по изучению реактивности подкритической сборки «Ялина-Тепловая». Для этого были проведены измерения эффективного коэффициента размножения нейтронов ($k_{эфф}$) тремя независимыми методами: обратного умножения, вероятностным и импульсным. Исследование выполнялось для топливной загрузки из 285 твэлов ЭК-10. Для метода обратного умножения измеренный коэффициент умножения составил $M = 22,3 \pm 0,6$, что соответствует эффективному коэффициенту размножения нейтронов $k_{эфф} = 0,9551 \pm 0,0016$. Измерения по вероятностному методу, или методу Фейнман-альфа, основанному на измерении флуктуации уровня нейтронной плотности в системе, дали значение $k_{эфф} = 0,9597 \pm 0,0003$. При изучении поведения нейтронов после введения нейтронного импульса в подкритическую среду (импульсный метод) была измерена постоянная спада мгновенных нейтронов $\alpha = -670 \pm 0,7$ 1/с, которая соответствует $k_{эфф} = 0,9560 \pm 0,0001$. В результате проведенных исследований получено среднее значение $k_{эфф}$ подкритической сборки «Ялина-Тепловая», которое составило $k_{эфф} = 0,9569 \pm 0,0018$. Рассмотренные методы могут применяться для мониторинга уровня подкритичности ADS-систем и исследовательских ядерных установок.

Ключевые слова: подкритическая сборка, генератор нейтронов, метод обратного умножения, вероятностный метод, метод Фейнман-альфа, импульсный метод, эффективный коэффициент размножения нейтронов

Для цитирования: Определение эффективного коэффициента размножения нейтронов подкритической сборки «Ялина-Тепловая» / И. А. Едчик [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 235–242. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-235-242>

**Ivan A. Edchik, Tamara N. Korbut, Andrey V. Kuzmin, Sergey E. Mazanik, Vladislav P. Togushov,
Maksim O. Kravchenko***Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus***EXPERIMENTAL METHODS FOR DETERMINING THE EFFECTIVE NEUTRON MULTIPLICATION
FACTOR OF THE “YALINA-THERMAL” SUBCRITICAL ASSEMBLY**

Abstract. To study the kinetics of subcritical systems and determine the optimal conditions for the transmutation of long-lived radioactive waste in the neutron spectrum of ADS-systems the “Yalina” research nuclear facility was created at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (Minsk, Belarus). The main safety indicator of a subcritical system (active zone reactivity) was measured for a “Yalina-Thermal” assembly via three independent methods: inverse multiplication, probabilistic and impulse ones. For the inverse multiplication method, the neutron flux density was monitored during assembly loading. For a fuel load of 285 EK-10 rods the neutron multiplication was $M = 22.3 \pm 0.6$, and the effective neutron multiplication coefficient was $k_{eff} = 0.9551 \pm 0.0016$. The probabilistic method (Feynman-alpha method), based on measuring fluctuations in the neutron density level within a system with a fission chain reaction, gave the ratio of the variance to the average counting rate value $D/n = 1.779 \pm 0.005$, which corresponds to $k_{eff} = 0.9597 \pm 0.0003$. The pulse method is aimed at studying the neutron flux behavior of after the neutron pulse injection into the breeding system. Measurements were held with the same setup, used in the Feynman-alpha method. The measured decay constant of instantaneous neutrons is $\alpha = -670 \pm 0.7$ 1/s, which corresponds to $k_{eff} = 0.9560 \pm 0.0001$. The effective multiplication factor k_{eff} of the subcritical assembly “Yalina-Thermal”, obtained via three different independent methods, is around average value of $k_{eff} = 0.9569 \pm 0.0018$. The methods considered can be used for subcritical level monitoring for ADS-systems and research nuclear facilities.

Keywords: subcritical assembly, neutron generator, inverse multiplication method, probabilistic method, Feynman-alpha method, pulsed method, effective neutron multiplication factor

For citation: Edchik I. A., Korbut T. N., Kuzmin A. V., Mazanik S. E., Togushov V. P., Kravchenko M. O. Experimental methods for determining the effective neutron multiplication factor of the “Yalina-Thermal” subcritical assembly. *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. 2, pp. 235–242 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-235-242>

Введение. Наряду с преимуществами по сравнению с другими видами энергии ядерная энергетика обладает двумя существенными недостатками. Для компенсации выгорания ядерного топлива, отравления, шлакования и других эффектов в реакторах энергетических ядерных установок требуется избыточная первоначальная загрузка ядерного топлива, обеспечивающая запас реактивности, что вызывает принципиальную возможность возникновения аварийных ситуаций с неконтролируемым увеличением выделяемой реактором мощности. Загрузка водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) составляет порядка 30–40 критических масс, реактора большой мощности канального (РБМК) – 60–70 критических масс. Второй проблемой является утилизация высокоактивных долгоживущих радиоактивных отходов (РАО), образующихся в энергетических реакторах за кампанию. В настоящее время концепция обращения с РАО ядерных держав заключается в складировании и последующем долговременном хранении в специальных помещениях либо в окончательном захоронении их в глубоких геологических формациях. Таким образом, в данных условиях актуальными становятся развитие и отработка методов контроля реактивности на ядерных установках (ЯУ), а также потребность в поддержании современного уровня знаний в ядерной отрасли и подготовка научных кадров в этой области.

Одним из путей решения указанных проблем было предложение использовать в качестве источника энергии подкритический реактор, процесс деления ядерного топлива в котором инициируется и управляется внешним источником нейтронов. Возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления в подкритическом реакторе невозможно [1]. Подкритический реактор предлагается также рассматривать как источник нейтронов для трансмутации, то есть для перевода долгоживущих радиоактивных осколков деления и минор-актинидов (МА) в короткоживущие либо стабильные изотопы [2].

Для изучения физики и в первую очередь кинетики подкритических систем, а также возможности трансмутации долгоживущих РАО в спектре нейтронного потока таких систем в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси была создана исследовательская ядерная установка «Яліна» (ИЯУ «Яліна»).

Целью настоящей работы явилось определение наиболее важного параметра активной зоны ИЯУ «Яліна» – эффективного коэффициента размножения нейтронов ($k_{\text{эфф}}$) – тремя независимыми методами: обратного умножения, вероятностным и импульсным, что необходимо для обоснования ядерной безопасности исследовательского комплекса.

Краткое описание ИЯУ «Яліна». ИЯУ «Яліна» включает генератор нейтронов НГ-12-1; две подкритические сборки: «Яліна-Тепловая» с тепловым спектром нейтронов и «Яліна-Бустер» с быстро-тепловым спектром нейтронов; измерительный комплекс; систему жизнеобеспечения и систему физической защиты. Генератор нейтронов НГ-12-1 представляет собой ускоритель ионов дейтерия с магнитной сепарацией ускоренного пучка и вращающейся титан-тритиевой или титан-дейтериевой мишенью. Тракт ускорения и транспортировки пучка – горизонтальный. Сепарация пучка и вращение мишени позволяет значительно увеличить срок службы мишени. Ионы дейтерия образуются в двухплазменном ионном источнике, формируются в пучок и ускоряются электрическим полем ускорительной трубки до энергии $E_d \sim 240$ кэВ. При использовании титан-дейтериевой мишени формируются нейтроны с энергией $E_n = 2,5$ МэВ, титан-тритиевой мишени – $E_n = 14,1$ МэВ. В экспериментах также используется изотопный источник на основе калифорния. Схема и общий вид сборки показан на рис. 1.

Активная зона подкритической сборки «Яліна-Тепловая» представляет собой параллелепипед $400 \times 400 \times 600$ мм, окруженный боковым отражателем из графита толщиной 400 мм. Положение активной зоны – горизонтальное. Активная зона набирается из полиэтиленовых кассет бесчехловой конструкции, содержащих тепловыделяющие элементы ЭК-10, расположенные по прямоугольной регулярной решетке шагом 20 мм. Кассета набирается из 12 малых блоков $80 \times 80 \times 48$ мм, изготовленных из блочного полиэтилена высокого давления плотностью $\gamma = 0,927$ г/см³.

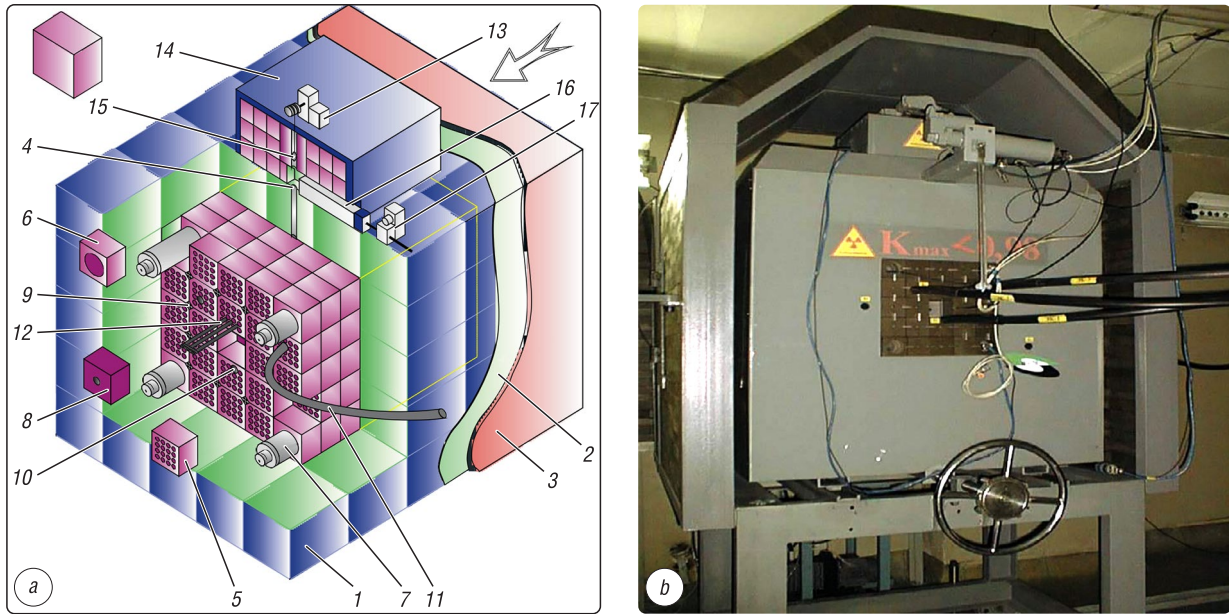


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (b) подкритической сборки «Яліна-Тепловая»: 1 – графитовый блок, 2 – кадмиевый экран, 3 – корпус, 4 – канал подвода нейтронного источника, 5 – полиэтиленовый блок, 6 – блок СУЗ, 7 – нейтронный детектор, 8 – свинцовая мишень, 9 – запирающий элемент, 10 – экспериментальный канал, 11 – кабельный трубопровод, 12 – компенсирующие органы управления, 13 – сервопривод нейтронного источника, 14 – контейнер нейтронного источника, 15 – нейтронный источник, 16 – заслонка, 17 – привод заслонки

Fig. 1. Scheme (a) and general view (b) of the sub-critical assembly “Yalina-Thermal”: 1 – graphite block, 2 – cadmium screen, 3 – case, 4 – neutron source supply channel, 5 – polyethylene block, 6 – CPS block, 7 – neutron detector, 8 – lead target, 9 – locking element, 10 – experimental channel, 11 – cable conduit, 12 – compensating controls, 13 – servo drive of a neutron source, 14 – container of a neutron source, 15 – neutron source, 16 – shutter, 17 – shutter drive

Шаг прямоугольной решетки, равный 20 мм, является оптимальным для размножающей среды с полиэтиленовым замедлителем и твэлами ЭК-10. Твэл ЭК-10 представляет с собой трубку из алюминия марки САВ (ГОСТ 4784–2019) длиной 590 мм, внешним диаметром 10 мм с толщиной стенки 1,5 мм, заполненную диоксидом урана 10%-ного обогащения по U-235. Длина топливной части твэла равна 500 мм, среднее содержание U-235 в твэле составляет ~7,76 г.

По центру активной зоны размещена свинцовая кассета, по размерам не отличающаяся от топливной кассеты с центральным каналом Ø11 мм.

По углам активной зоны установлены кассеты измерительных каналов, составленных из девяти малых блоков полиэтилена размером 80×80×63 мм со сквозным центральным каналом Ø55 мм для размещения датчиков контроля нейтронного потока.

Проведенные в трех кассетах активной зоны три твэльных канала с увеличенными до 24 мм диаметрами служат экспериментальными каналами. В четвертой кассете между вторым и третьим рядом твэлов выполнены три канала для размещения в них поглощающих стержней с В₄С компенсирующего органа (КО).

Таким образом, активная зона подкритической сборки содержит 20 топливных кассет, четыре кассеты СУЗ (система управления и защиты), свинцовую мишень, три измерительных канала и КО. Картограмма незагруженной активной зоны показана на рис. 2. Реактивность сборки определялась тремя методами: обратного умножения, вероятностным и импульсным.

Метод обратного умножения. Известно, что умножение M нейтронов в подкритической системе связано с эффективным коэффициентом размножения нейтронов $k_{эфф}$ соотношением [3]

$$M = \frac{1}{1 - k_{эфф}} \Rightarrow k_{эфф} = \frac{M - 1}{M}, \quad (1)$$

где $M = \frac{n}{n_0}$ равно отношению скорости счета n детектора, соответствующей загрузке m , к скорости счета n_0 детектора в «пустой», незагруженной ($m = 0$), сборке.

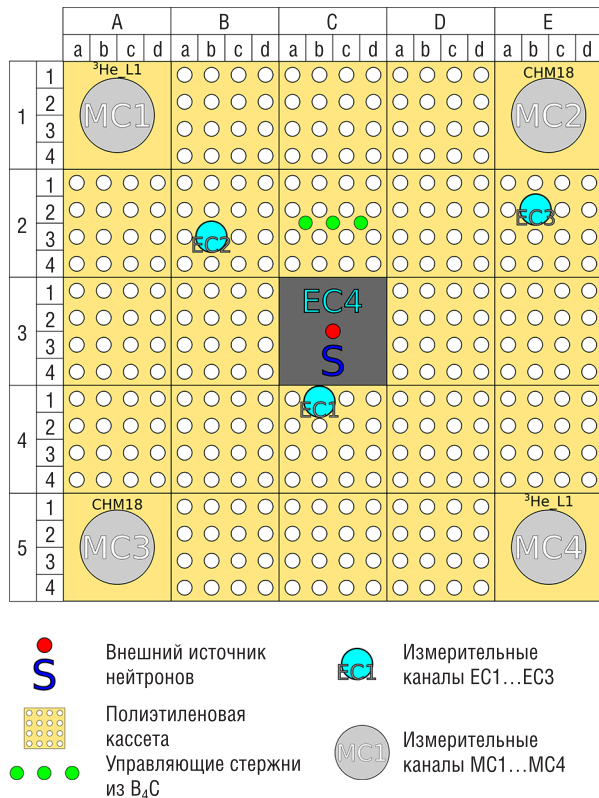


Рис. 2. Картограмма начального состояния активной зоны подкритической сборки «Ялина-Тепловая»

Fig. 2. “Yalina-Thermal” active zone initial state layout

янная спада мгновенных нейтронов, τ – длительность счетных интервалов, ε – эффективность регистрации нейтронов, e – экспонента.

Величина Y равна нулю для случайных пуассоновских флуктуаций. В справедливости этого утверждения авторы статьи убедились экспериментально. Для этого отношения дисперсии к среднему значению интенсивности нейтронного потока измеряли ³He-детектором 12NH25/1F в ячейке Dd-34 «пустой», незагруженной, сборки с установленным в центр активной зоны нейтронным источником ИНК-7-3 при $\tau = 60$ мс, $D / \bar{n} = 1,000 \pm 0,003$.

Функция Y связана с параметрами реактора, и в системе с цепной реакцией деления Y является мерой дополнительных флуктуаций, величина которых зависит от параметров системы, и в первую очередь от k_p .

Рассчитав некоторые параметры либо оценив их в независимом эксперименте, можно по измеренному отношению дисперсии к среднему определить эффективный коэффициент размножения и подкритичность сборки.

Упростим выражение (3). Оценка величины $(\overline{v_p^2} - \overline{v_p}) / (\overline{v_p})^2$ по данным [3] составляет 0,795.

В последнем сомножителе постоянная спада α мгновенных нейтронов для тепловой сборки при загрузке 284 твэла ЭК-10, измеренная в ячейке Dd-33, составляет 670 с^{-1} .

Использование этой величины при длительности счетного интервала $\tau = 60$ мс дает значение последнего сомножителя 0,975. Известно, что при меньших загрузках подкритичность сборки

Значения M и $k_{\text{эфф}}$ подкритической сборки при загрузке $m = 285$ твэлов ЭК-10, измеренные в каналах MC1...MC4
 M and k_{eff} values for the subcritical load of 285 Ek-10 fuel rods and measured in MC1 through MC4

M				$k_{\text{эфф}}$				
MC1	MC2	MC3	MC4	MC1	MC2	MC3	MC4	Среднее значение
23,30	21,41	21,15	23,48	0,9571	0,9533	0,9527	0,9574	0,9551 ± 0,0016

Контроль плотности потока нейтронов в процессе загрузки сборки осуществлялся с помощью счетчиков медленных нейтронов типа СНМ-18 и 12NH25/1F, находящихся в измерительных каналах MC1...MC4, при установленном в центр активной зоны Cf-252 нейтронном источнике.

Значение M и $k_{\text{эфф}}$ при загрузке $m = 285$ твэлов ЭК-10 представлены в таблице.

Вероятностный метод. Вероятностный метод, или метод Фейнман-альфа, основан на общем теоретическом рассмотрении флуктуаций уровня нейтронной плотности в системе с цепной реакцией деления. Для детектора, помещенного в реактор, отношение дисперсии D скорости счета n к среднему значению выражается следующим соотношением [3]:

$$\frac{D}{\bar{n}} = \frac{\overline{n^2} - \bar{n}^2}{\bar{n}} = 1 + Y, \quad (2)$$

где

$$Y = \varepsilon \frac{\overline{v_p^2} - \overline{v_p}}{(\overline{v_p})^2} \frac{k_p^2}{(1 - k_p)^2} \left(1 + \frac{1 - e^{-\alpha\tau}}{\alpha\tau} \right). \quad (3)$$

Здесь v_p – число мгновенных нейтронов в 1-м акте деления, k_p – коэффициент размножения на мгновенных нейтронах, α – постоянная спада мгновенных нейтронов, τ – длительность счетных интервалов, ε – эффективность регистрации нейтронов, e – экспонента.

увеличивается, абсолютное значение постоянной спада α растет, поправочный коэффициент, содержащий α , стремится к единице.

Эффективность ε регистрации нейтронов детектором можно определять двумя способами. Первый способ – как отношение скорости счета n_0 детектора в «пустой» незагруженной сборке к интенсивности нейтронного источника I

$$\varepsilon = \frac{n_0}{I}; \tag{4}$$

второй – как отношение скорости счета n для загрузки m к максимально возможному количеству нейтронов, произведенных в активной зоне, в этой загрузке m :

$$\varepsilon = \frac{n}{M \cdot I}, \tag{5}$$

где M – умножение нейтронов.

В первом случае для ячейки Dd-33 нами получено значение $\varepsilon = 3,32 \cdot 10^{-3}$, во втором $\varepsilon = 1,97 \cdot 10^{-3}$. Для вычислений будем использовать среднее значение $\varepsilon = 2,64 \cdot 10^{-3}$.

Подстановка числовых значений упростит выражение (2):

$$\frac{D}{\bar{n}} = 1 + 2,046 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{k_p}{1 - k_p} \right)^2, \quad k_p = k_{\text{эфф}} \cdot (1 - \beta_{\text{эфф}}). \tag{6}$$

В результате получили уравнение с одним неизвестным, где величина дисперсии однозначно связана с эффективным коэффициентом размножения нейтронов в сборке.

Отношение дисперсии к среднему измерялось в средней части кольцевой активной зоны (ячейка Dd-33) с помощью ^3He -детектора 12NH25/1F. Детектор помещался в топливный канал вместо извлеченного твэла. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 3. Картограмма загрузки представлена на рис. 4.

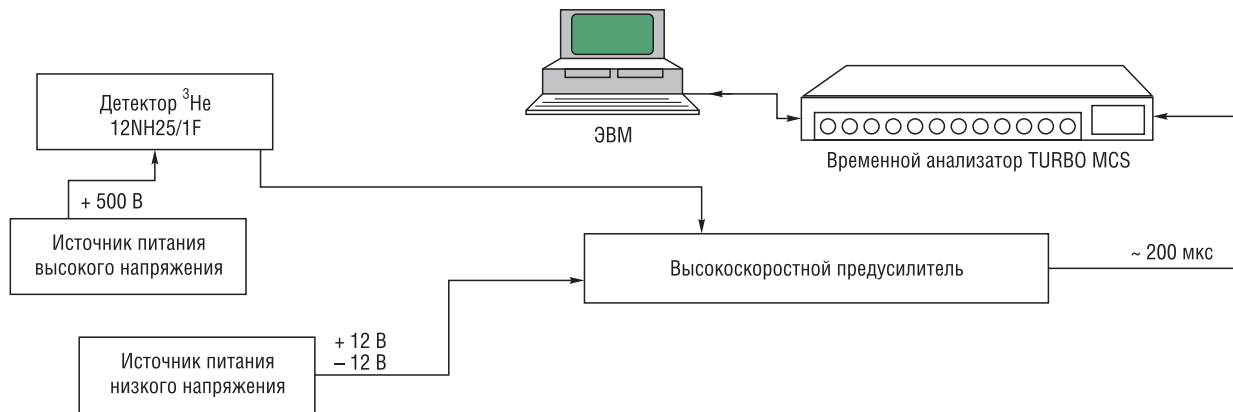


Рис. 3. Блок-схема измерительной установки

Fig. 3. Measurement setup diagram

Измеренное значение в ячейке Dd-33 при $m = 284$ твэл ЭК-10 составило $D / \bar{n} = 1,779 \pm 0,005$. Подстановка этого значения в (6) дает $k_{\text{эфф}} = 0,9589 \pm 0,0003$. Для загрузки $m = 285$ твэлов необходимо вести поправку на эффективность одного твэла, расположенного в активной зоне на позиции Dd-33, равную $\Delta k = 0,1 \cdot \beta_{\text{эфф}} \approx 0,00078$, следовательно, при $m = 285$ твэлов ЭК-10 $k_{\text{эфф}} = 0,9597 \pm 0,0003$.

Импульсный метод. Импульсный метод является более прямым способом получения характеристик реакторных систем, чем вероятностный метод. Основной принцип этого метода – исследование поведения нейтронов после введения нейтронного импульса в изучаемую среду. Несмотря на низкий выход нейтронов на один импульс, хорошая статистическая точность может быть обеспечена за счет высокой частоты повторения импульсов.

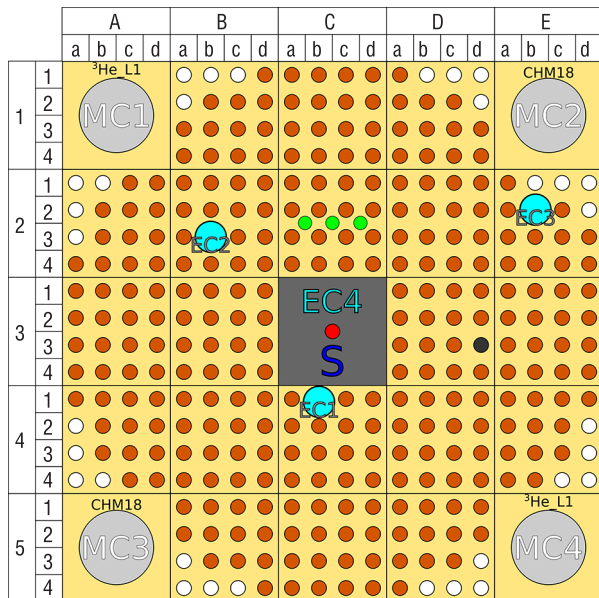


Рис. 4. Положение детектора He-3 вместо твэла в ячейке Dd-33 (в активную зону загружен 284 твэл ЭК-10)
 Fig. 4. He-3 detector placement instead of Dd-33 fuel rod (284 EK-10 fuel rods loaded into the core)

менного анализатора типа TURBO MCS фирмы ORTEC [4]. Запуск измерения производится от синхроимпульса, сформированного от тока пучка ионов по фронту блоком формирования и измерения тока пучка НГ-12-1. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 5.

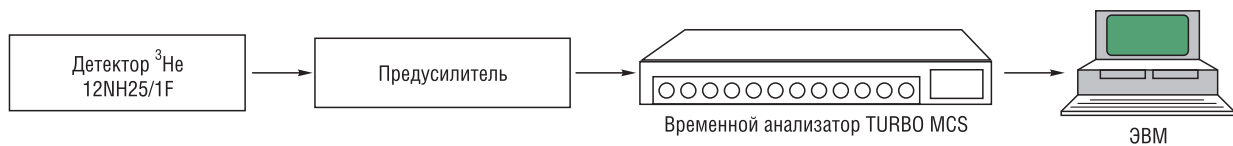


Рис. 5. Блок-схема измерительной установки
 Fig. 5. Measurement setup diagram

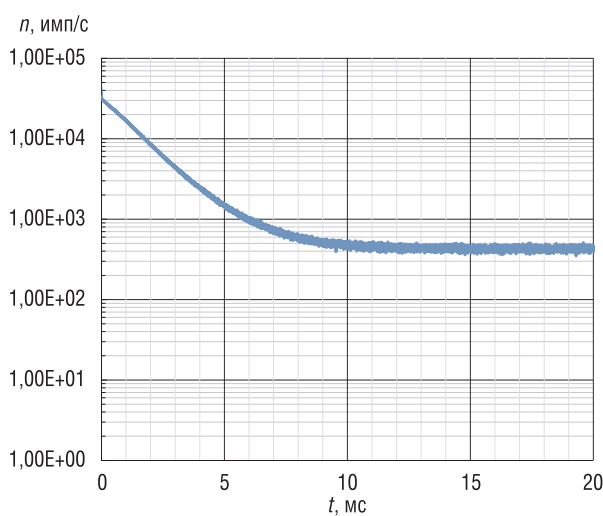


Рис. 6. Кривая спада плотности нейтронного потока в зависимости от времени подкритической сборки при облучении ее импульсным источником
 Fig. 6. Neutron flux density decline for the subcritical assembly under impulse neutron irradiation

Нейтронный импульс, введенный в размножающую среду, для которой $k_p < 1$, спадает по закону [3]

$$n(t) = n_e e^{\alpha t}, \quad (7)$$

где постоянная спада мгновенных нейтронов α является удобным параметром для определения реактивности сборки и определяется соотношением

$$\alpha = \frac{1}{n} \cdot \frac{dn}{dt} = \frac{k_p - 1}{l} = \frac{k_{эфф}(1 - \beta_{эфф})}{l}, \quad (8)$$

здесь $k_p = k_{эфф}(1 - \beta_{эфф})$ – коэффициент размножения мгновенных нейтронов, l – время жизни мгновенных нейтронов.

Для проведения нейтронно-физических измерений нами использовался разработанный и изготовленный в Объединенном институте энергетических и ядерных исследований – Сосны экспериментальный измерительный канал на основе счетчиков медленных нейтронов с радиатором из ³He типа 12NH25/1F фирмы EURISIS MEASURES (Франция), быстродействующего предварительного усилителя и вре-

менного анализатора типа TURBO MCS фирмы ORTEC [4]. Запуск измерения производится от синхроимпульса, сформированного от тока пучка ионов по фронту блоком формирования и измерения тока пучка НГ-12-1. Блок-схема измерительной установки показана на рис. 5.

Титан-третиевая мишень располагалась таким образом, чтобы точки рождения нейтронов находились в центре активной зоны. Частота задающего кварцевого генератора управления блоком ионного источника равнялась 49 Гц, длительность ионного импульса – 5 мкс, ускоряющее напряжение – 95 кВ. Ширина счетного канала (bin) составляла 2 мкс. Количество каналов временного анализатора (число bin-ов) равнялось 10 200. Каждый сеанс облучения содержал 50 000 циклов.

Постоянная спада мгновенных нейтронов измерялась в твэльном канале Dd-33 средней части кольцевой активной зоны, для чего из активной зоны извлекался твэл ЭК-10, а на его место устанавливался счетчик 12NH25/1F. Середина чувствительной области детектора совпадала с серединой активной зоны сборки. На рис. 6 приведен в качестве примера отклик сборки на нейтронный импульс.

Вычисление α по формуле $\alpha = \frac{\ln[n(t_2)/n(t_1)]}{t_2 - t_1}$ проводилось на прямолинейном участке зависимости $\ln[n(t)] = f(t)$ в диапазоне от 1 до 5 мс. Получены следующие значения: $\alpha = -(6,700 \pm 0,007) \cdot 10^2 \text{ с}^{-1}$, $k_{\text{эфф}} = \frac{1 + \alpha l}{1 - \beta_{\text{эфф}}} = 0,9552 \pm 0,0001$, где время жизни $l = 78 \cdot 10^{-6} \text{ с}$ взято из расчетного значения [5] и $\beta = 0,00781$ [4]. Скорректированное значение $k_{\text{эфф}}$ для загрузки $m = 285$ твэлов ЭК-10 составит $0,9560 \pm 0,0001$.

Заклучение. В результате измерения тремя различными независимыми методами (обратного умножения, вероятностным и импульсным) получен $k_{\text{эфф}}$ подкритической сборки «Яліна-Тепловая». Все три метода дают согласованные результаты, среднее значение равно $k_{\text{эфф}} = 0,9569 \pm 0,0018$.

Поскольку в применяемых методах использовались как расчетные, так и экспериментальные параметры сборки с тепловым спектром нейтронов и получены согласованные результаты с погрешностью около 0,19 %, то к этим величинам можно относиться с высокой долей доверия и утверждать, что подкритичность подобных сборок определяется надежно. Данные результаты будут использоваться при обосновании ядерной безопасности экспериментальной установки при проведении дальнейших исследований.

Вопросы влияния пространственных эффектов на величину подкритичности сборки являются темой отдельного рассмотрения и экспериментальных исследований.

Благодарности

Работа выполнена в рамках реализации задания Государственной программы научных исследований на 2019–2020 годы «Энергетические системы, процессы и технологии» подпрограммы 1.3 «Атомная энергетика и ядерные-физические технологии».

Acknowledgments

The work was held within the subprogram 1.3 “Atomic energy and nuclear physics technologies” under Governmental Scientific Research Program “Energy systems, processes and technologies” realization.

Список использованных источников

1. Salvatores, M. Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei / M. Salvatores, I. Slessarev, M. Uematsu // Nucl. Sci. Technol. – 1994. – Vol. 116, iss. 1. – P. 215–227. <https://doi.org/10.13182/NSE94-A21476>
2. The Research of Transmutation of Long-Lived Fission Products and Minor-Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by the Neutron Generator / S. Chigrinov [et al.] // Proc. of the 2nd Int. Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies & Applications (ADTTA), Kalmar, Sweden, June 1996. – Vol. 2. – P. 737–741.
3. Кипин, Дж. Р. Физические основы кинетики ядерных реакторов / Дж. Р. Кипин. – М.: Атомиздат, 1967. – 428 с.
4. Отчет по обоснованию безопасности подкритического стенда «Яліна», 5 редакция. – Минск: ОИЭЯИ-Сосны, 2016. – 178 с.
5. Use of Low Enriched Uranium Fuel in Accelerator Driven Subcritical Systems [Electronic Resource]: IAEA-TECDOC-1821 / International Atomic Energy Agency. – Vienna, 2017. – Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1821_web.pdf

References

1. Salvatores M., Slessarev I., Uematsu M. Global Physics Approach to Transmutation of Radioactive Nuclei. *Nuclear Science and Engineering*, 1994, vol. 116, iss. 1, pp. 215–227. <https://doi.org/10.13182/NSE94-A21476>
2. Chigrinov S., Kiyavitskaya H., Serafimovich I., Bournos V., Fokov Yu., Korneev S. The Research of Transmutation of Long-Lived Fission Products and Minor-Actinides in a Sub-critical Assembly Driven by the Neutron Generator. *Proceedings of 2nd International Conference on Accelerator Driven Transmutation Technologies and Applications (ADTTA), Kalmar, Sweden, June 1996, vol. 2, pp. 737–741.*
3. Kipin J. R. *Physical Fundamentals of Nuclear Reactor Kinetics*. Moscow, Atomizdat Publ., 1967. 428 p. (in Russian).
4. *Safety Substantiation Report for the “Yalina” Subcritical Assembly*, 5 formulation. Minsk, JIPNR – Sosny, 2016. 178 p. (in Russian).
5. International Atomic Energy Agency. *Use of Low Enriched Uranium Fuel in Accelerator Driven Subcritical Systems: IAEA-TECDOC-1821*. Vienna, 2017. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1821_web.pdf

Информация об авторах

Едчик Иван Адамович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь). E-mail: lab21@sosny.bas-net.by

Корбут Тамара Николаевна – кандидат технических наук, заместитель генерального директора, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь). E-mail: korbut@sosny.bas-net.by

Кузьмин Андрей Владимирович – кандидат физико-математических наук, генеральный директор, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь). E-mail: avkuzmin@sosny.bas-net.by

Мазаник Сергей Эдуардович – начальник смены ИЯУ, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь).

Тогущов Владислав Павлович – инженер-электроник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь).

Кравченко Максим Олегович – младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (ул. Красина, 99, 223063, Минск, Республика Беларусь). E-mail: m.kravch@sosny.bas-net.by

Information about the authors

Ivan A. Edchik – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: lab21@sosny.bas-net.by

Tamara N. Korbut – Ph. D. (Engineering), Deputy Director, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: korbut@sosny.bas-net.by

Andrey V. Kuzmin – Ph. D. (Physics and Mathematics), Director the General, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: avkuzmin@sosny.bas-net.by

Sergey E. Mazanik – Shift Supervisor, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus).

Vladislav P. Togushov – Electronic Engineer, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus).

Maksim O. Kravchenko – Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (99, Krasin Str., 223063, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: m.kravch@sosny.bas-net.by

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 621.039.743

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>

Поступила в редакцию 02.04.2020

Received 02.04.2020

Ю. А. Корчева, Н. В. Горбачева, Н. Д. Кузьмина, Н. В. Кулич*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь***ОЦЕНКА ЗАПАСОВ АКТИВНОСТИ ПО НОМЕНКЛАТУРЕ ОСНОВНЫХ
РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ РАДИОНУКЛИДОВ ПРИ ДОЛГОВРЕМЕННОМ
ОБРАЩЕНИИ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ БЕЛОРУССКОЙ АЭС**

Аннотация. Разработаны вероятностная модель и математическая программа CUB, обеспечивающая прогноз запасов активности по перечню наиболее опасных продуктов деления и актиноидов на разных фазах обращения с отработавшим ядерным топливом и продуктами его переработки, определенных Стратегией обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС. Проведено обоснование возможности применения для прогнозирования запасов активностей радионуклидов на установках по обращению с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС референтных данных, полученных по материалам нормативного документа РБ-093-14 «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных», в котором приведены сведения для отработавшего ядерного топлива ВВЭР-1000 с разной степенью обогащения, включая 4,81 % по ^{235}U . Выполнен анализ влияния степени начального обогащения топлива по ^{235}U и глубины выгорания отработавшего ядерного топлива на удельные активности основных радиационно опасных продуктов деления и актиноидов. Представлены результаты расчета активностей продуктов деления и актиноидов в отработавших тепловыделяющих сборках со средней глубиной выгорания 55,6 МВт-сут/т U для топлива с начальным обогащением 4,81 % по ^{235}U . На основе полученных данных с использованием разработанной вероятностной модели выполнен прогноз запасов и темпов снижения активности по основным радиационно опасным продуктам деления и актиноидам отработавшего ядерного топлива энергоблоков №1 и 2 Белорусской АЭС на разных временных интервалах. Полученные результаты могут быть использованы при проведении оценки безопасности объектов хранения отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС и продуктов его переработки, а также предварительной оценки активности при возврате и хранении продуктов переработки отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС на основе принципа радиационного эквивалента.

Ключевые слова: Белорусская атомная электростанция, водо-водяной энергетический реактор, отработавшее ядерное топливо, актиниды, продукты деления, суммарная активность

Для цитирования: Оценка запасов активности по номенклатуре основных радиационно опасных радионуклидов при долговременном обращении с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС / Ю. А. Корчева [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, №2. – С. 243–251. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>

Julia A. Korchova, Natalia V. Harbachova, Natalia D. Kuzmina, Nikolai V. Kulich*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,
Republic of Belarus***ASSESSMENT OF ACTIVITY RESOURCES BY NOMENCLATURE OF MAIN RADIATION-HAZARDOUS
RADIONUCLIDES DURING THE LONG-TERM MANAGEMENT OF SPENT NUCLEAR FUEL OF THE
BELARUSIAN NPP**

Abstract. The purpose of the study is calculation research of the radiation characteristics of fission products and actinides at different phases of spent nuclear fuel (SNF) management of the Belarusian Nuclear Power Plant (NPP). The study is aimed at the scientific support of the government decision as determined by the “On approval of the spent nuclear fuel management Strategy of the Belarusian nuclear power plant”. A probabilistic forecasting model and an effective code CUB for the spent nuclear fuel radioactivity inventory assessment were developed by the authors. Radionuclides activities as function of nuclear fuel burnup for nuclear fuel with the initial enrichment on the ^{235}U equals to 4.81 % on the base of approximation relations of Regulation RB-093-14 (Moscow, 2014) have been calculated. Basic relations between specific activities of the main hazardous fission products and actinide, the SNF burnup and initial degree of fuel enrichment were analyzed. The rates of decrease of individual and total fission products and actinides activities of the Units №1 and 2 of the Belarusian NPP were obtained depending on the specific phase of spent SNF management. The results are of value for decision-making on ecology acceptable SNF management option introduced by Spent Nuclear Fuel Management Strategy of the Belarusian NPP.

Keywords: Belarusian nuclear power plant, water-water power reactor, spent nuclear fuel, actinides, fission products, total activity

For citation: Korchova J. A., Harbachova N. V., Kuzmina N. D., Kulich N. V. Assessment of activity resources by nomenclature of main radiation-hazardous radionuclides during the long-term management of spent nuclear fuel of the Belarusian NPP. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 243–251 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>

Введение. В настоящее время в Республике Беларусь завершается этап сооружения и идет подготовка к вводу в эксплуатацию первого энергоблока Белорусской АЭС с реактором типа ВВЭР-1200. Одной из проблем, сдерживающих развитие атомной энергетики во всем мире, является накопление в процессе эксплуатации АЭС значительных запасов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) [1]. Поиск путей эффективного и безопасного обращения с ОЯТ является приоритетной задачей, решение которой в Беларуси определено Стратегией обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС (далее – Стратегия), утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 22.08.2019 № 558. В соответствии с данным документом предусмотрены следующие основные фазы обращения с ОЯТ Белорусской АЭС:

- выгрузка из активной зоны реактора в приреакторный бассейн выдержки на срок до 10 лет;
- промежуточное хранение ОЯТ после выгрузки его из приреакторных бассейнов выдержки до отправки на переработку;
- переработка ОЯТ на предприятиях Российской Федерации;
- возврат продуктов переработки ОЯТ с учетом принципа радиационного эквивалента и их хранение;

захоронение продуктов переработки в виде цезиево-стронциевой фракции на территории Республики Беларусь (предпочтительный вариант Стратегии).

По предварительным данным на Белорусской АЭС будет реализован четырехгодичный топливный цикл с перегрузкой один раз в 12 месяцев, так что количество отработавших тепло-выделяющих сборок (ОТВС), выгруженных из двух энергоблоков Белорусской АЭС за 60 лет эксплуатации, и масса содержащегося в них тяжелого металла (ТМ) составят: при глубине выгорания до 50 МВт·сут/кг U – 1076 ТВС (506 т ТМ); от 50 до 55 МВт·сут/кг U – 148 ТВС (70 т ТМ), а при выгорании свыше 55 МВт·сут/кг U – 4070 ТВС (1916 т ТМ). Общая оценка запасов ОЯТ дает 5294 ед. ОТВС с массой 2492 т ТМ.

Объективную количественную основу для оценки рисков технологий по обращению с ОЯТ и расчетов экономических затрат при реализации вариантов Стратегии можно получить на основе прогнозных оценок запасов высокотоксичных актинидов и долгоживущих продуктов деления, входящих в состав ОЯТ. Проведенные в данной работе исследования направлены на решение двух задач. Первая – изучение влияния степени начального обогащения топлива по ^{235}U и глубины выгорания на удельную активность актинидов и продуктов деления в топливе ВВЭР-1200. Вторая – расчетное исследование запасов активности по номенклатуре основных радиационно опасных радионуклидов в ОЯТ и прогноз на различных фазах обращения с ОЯТ Белорусской АЭС. Авторами разработаны вероятностная модель и математическая программа, с помощью которой выполнены расчеты суммарных активностей основных продуктов деления и актинидов для средней глубины выгорания топлива Белорусской АЭС (55,6 МВт·сут/т U). Получены темпы снижения суммарной активности ОЯТ в зависимости от времени выдержки на различных этапах обращения с ОЯТ Белорусской АЭС.

Математическая модель формирования запасов радиоактивности в хранилище ОЯТ АЭС.

Для оценки запасов активности продуктов деления в условиях имеющейся на текущий момент неопределенности данных по режиму облучения, техническим характеристикам ОТВС, продолжительности фаз обращения с ОЯТ разработана вероятностная модель формирования запасов и прогнозирования темпов снижения радиоактивности ОЯТ в объектах ядерного топливного цикла Белорусской АЭС. Для разработки модели использована методология анализа дискретных вероятностных процессов [2, 3]. Первичным событием моделируемого процесса является перемещение ОТВС из активной зоны в бассейн выдержки энергоблоков № 1 или 2, выгорание которой достигло требуемой глубины выгорания топлива. Принимая во внимание прогнозируемое

количество ОТВС, отличающихся начальным обогащением k и глубиной выгорания B_n^k , недостаток на текущий момент информации по срокам выгрузки каждой ОТВС дает нам основание рассматривать процедуру перемещения n -й ОТВС случайным процессом на интервале времени жизни АЭС $[t_A, t_B]$. Тогда параметр, характеризующий длительность выдержки $\theta = t - t_n$ n -й ОТВС и, соответственно, активность r -го радионуклида $A_n^r(t_p - t_n)$ в момент времени, характерный для каждой фазы обращения $t = t_p$, также является случайной величиной.

Суммарная активность основных долгоживущих радиационно опасных продуктов деления и актинидов для всей массы M_{tot} ОЯТ в момент $t = t_p$ определяется по следующей формуле:

$$A(t_p) = \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R A_n^r(t_p - t_n) = \sum_{n=1}^N \sum_{r=1}^R \left[A_n^r(t_p - t_n) \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}^r}(t_p - t_n)\right) \right],$$

где $T_{1/2}^r$ – период полураспада r -го нуклида.

Задача оценки суммарной активности на каждой фазе обращения с ОЯТ сводится к простой, но трудоемкой процедуре суммирования, в которой параметр t_n является случайной величиной, заданной на интервале $[t_A, t_B]$ его возможных значений, где t_A и t_B – моменты времени выгрузки из реактора первой партии и последней партий ОТВС. С помощью процедур Монте-Карло, реализованных в разработанном для этих целей программном средстве имитационного моделирования SUB, реальная последовательность моментов выгрузки ОТВС моделируется равномерной выборкой случайных значений на интервале $[t_A, t_B]$. С помощью приведенного выше уравнения строится выборка случайных значений активности $A(\theta_n)$. Размер выборки принимает значение N , равное суммарному числу ОТВС, наработанных на энергоблоках №1 и 2 Белорусской АЭС за прогнозный срок эксплуатации.

Влияние степени начального обогащения топлива по ^{235}U и глубины выгорания на удельную активность актинидов и продуктов деления в топливе ВВЭР-1000. В настоящее время в Российской Федерации разработан нормативный документ РБ-093-14 «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных» (далее – РБ-093-14), содержащий рекомендации для подготовки радиационных характеристик ОЯТ различных типов реакторов, в том числе для водо-водяного типа (ВВЭР). В РБ-093-14 предложены приближенные аппроксимирующие зависимости удельных активностей основных радиационно опасных продуктов деления и актинидов от глубины выгорания для топлива с различным начальным обогащением по ^{235}U , используемого на АЭС с ВВЭР-1000, и оценена неопределенность приближенных расчетов концентраций (удельных активностей) актинидов и продуктов деления, которая лежит в диапазоне 1–64 %. В принципе, такой диапазон неопределенностей коррелирует с неопределенностью оценок глубины выгорания топлива в ОТВС, которая может быть получена расчетным либо экспериментальным методами. Для обозначенных в РБ-093-14 целей, а именно для проведения оценок радиационных характеристик ОЯТ в установках по обращению с ОЯТ, указанные неопределенности рассматриваются как приемлемые. Для подготовки необходимых исходных данных для предварительных расчетов запасов активности нами использованы методические материалы нормативного технического документа РБ-093-14. Пользуясь представленными в РБ-093-14 сведениями для топлива с начальным обогащением 4,81 % по ^{235}U ВВЭР-1000, авторами подготовлены базы данных в среде Microsoft Excel по активностям продуктов деления и актинидов в расчете на 1 ОТВС в зависимости от глубины выгорания [4]. Эти данные соответствуют фазе обращения с ОЯТ в приреакторном бассейне выдержки.

Для обоснования возможности применения данных на текущем этапе исследований для прогнозирования запасов активностей радионуклидов на установках по обращению с ОЯТ Белорусской АЭС, полученных по материалам РБ-093-14, выполнен анализ влияния степени начального обогащения и глубины выгорания топлива на удельные активности основных радиационно опасных продуктов деления и актинидов. Для этих целей выполнен сравнительный анализ полученных данных с результатами работы [5]. В данной работе для перспективного для ВВЭР-1200 топлива с начальным обогащением 4,95 % по ^{235}U результаты численных расчетов удельных активностей продуктов деления и актинидов, полученные с помощью программного средства MCU-PD, были представлены в аналитическом виде упрощенными аппроксимирующими зависимостями.

Зависимости удельных активностей продуктов деления и актинидов от глубины выгорания топлива в диапазоне выгорания от 40 до 70 МВт·сут/кг U для топлива с начальным обогащением 4,81 % в сопоставлении с аналогичными данными для топлива с начальным обогащением 4,95 % по ^{235}U представлены на рис. 1–4. Сравнительный анализ показал, что в интересующем нас диапазоне отличие результатов расчета удельных активностей продуктов деления и актинидов для топлива с начальным обогащением 4,95 % от референтных данных РБ-093-14 для топлива с обогащением 4,81 % составляет 3–15 %, что является вполне приемлемым для целей наших исследований. Для долгоживущих продуктов деления, таких как ^{90}Sr , ^{106}Ru , ^{99}Tc и некоторых других, влияние начального обогащения на их радиационные характеристики в рассматриваемом диапазоне выгорания не существенно. Влияние начального обогащения на удельные активности изотопов $^{239-241}\text{Pu}$ актинидов сказывается в большей степени, что связано со спецификой их образования в топливе ядерного реактора в процессе трансмутации. Авторами проведен анализ зависимости от степени обогащения и глубины выгорания одной из ключевых характеристик ОЯТ, на основании которой можно идентифицировать глубину выгорания – отношения активностей ^{134}Cs и ^{137}Cs (рис. 5). Различие отношений активностей $^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$, полученных по данным РБ-093-14 и по результатам расчетных исследований в [5], составляет величину порядка 8–10 %.

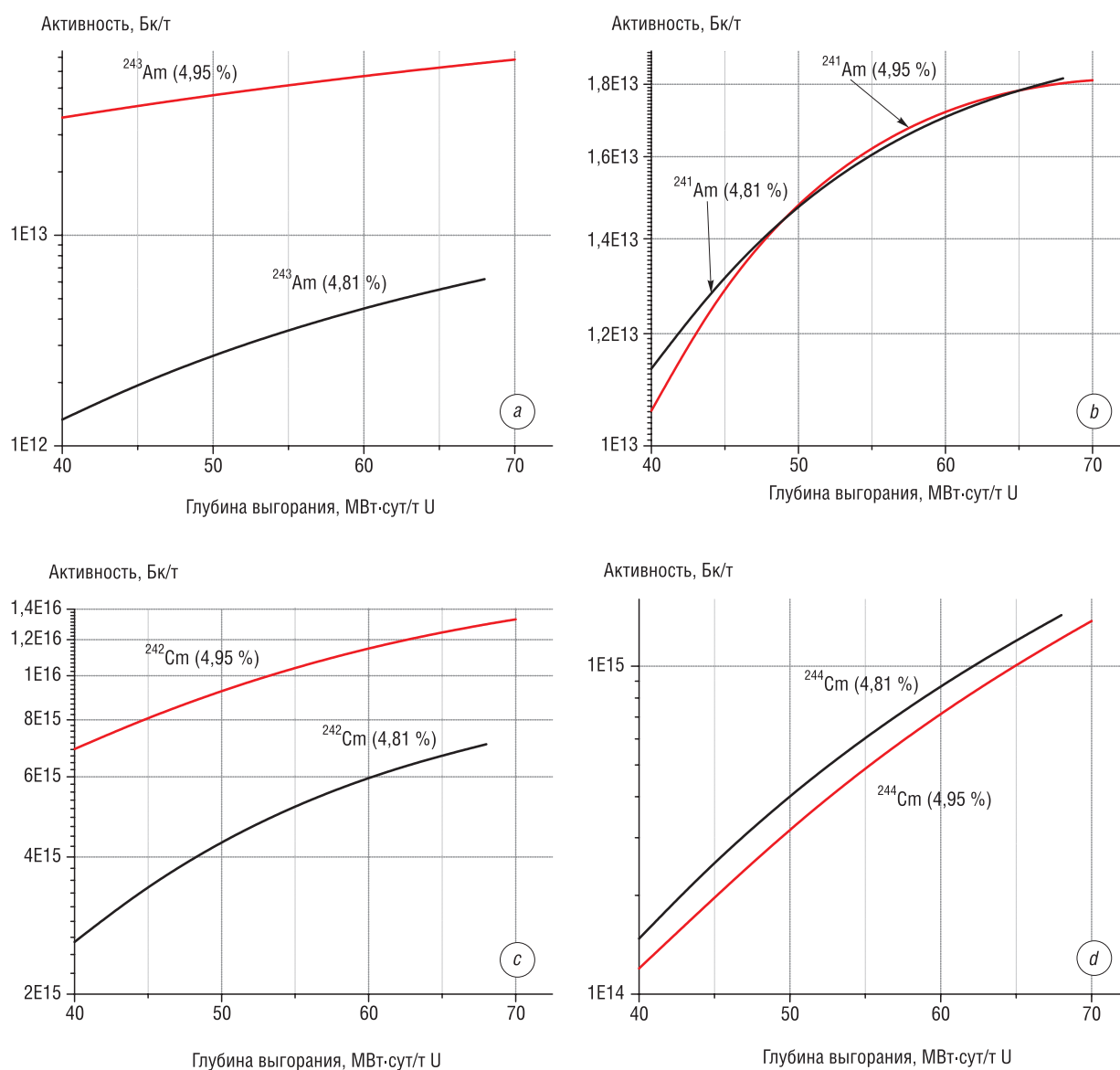


Рис. 1. Зависимости активностей ^{243}Am (a), ^{241}Am (b), ^{242}Cm (c), ^{244}Cm (d) от глубины выгорания топлива
 Fig. 1. ^{243}Am (a), ^{241}Am (b), ^{242}Cm (c), ^{244}Cm (d) activity dependencies from the fuel burnup

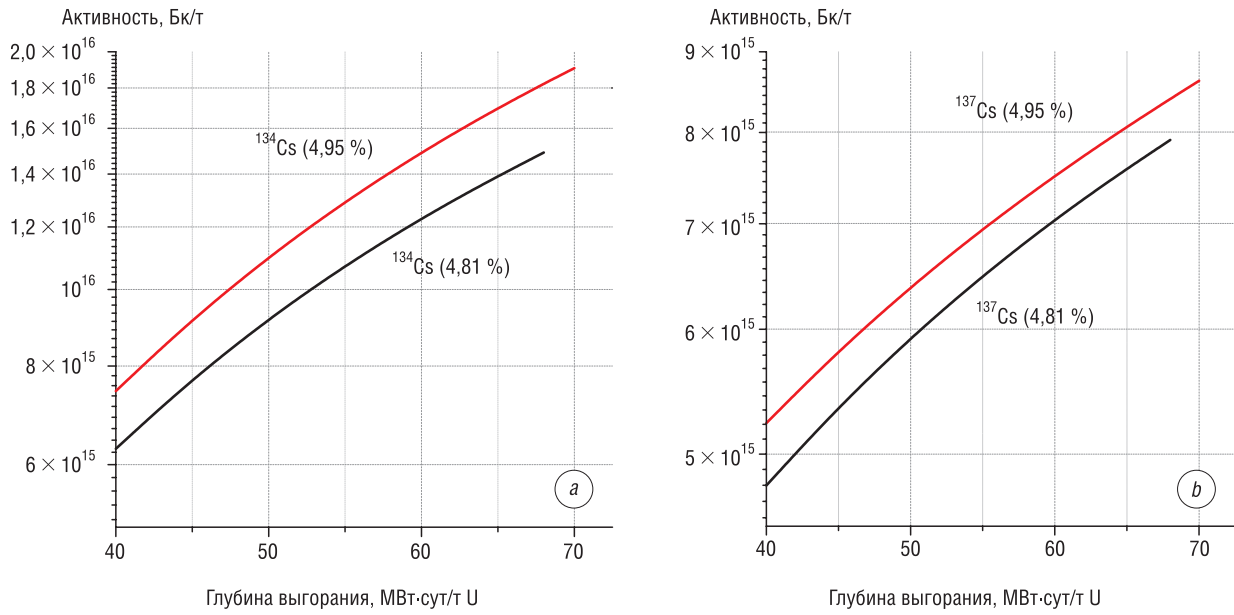


Рис. 2. Зависимости активностей ^{134}Cs (a), ^{137}Cs (b) от глубины выгорания топлива
 Fig. 2. ^{134}Cs (a), ^{137}Cs (b) activity dependencies from the fuel burnup

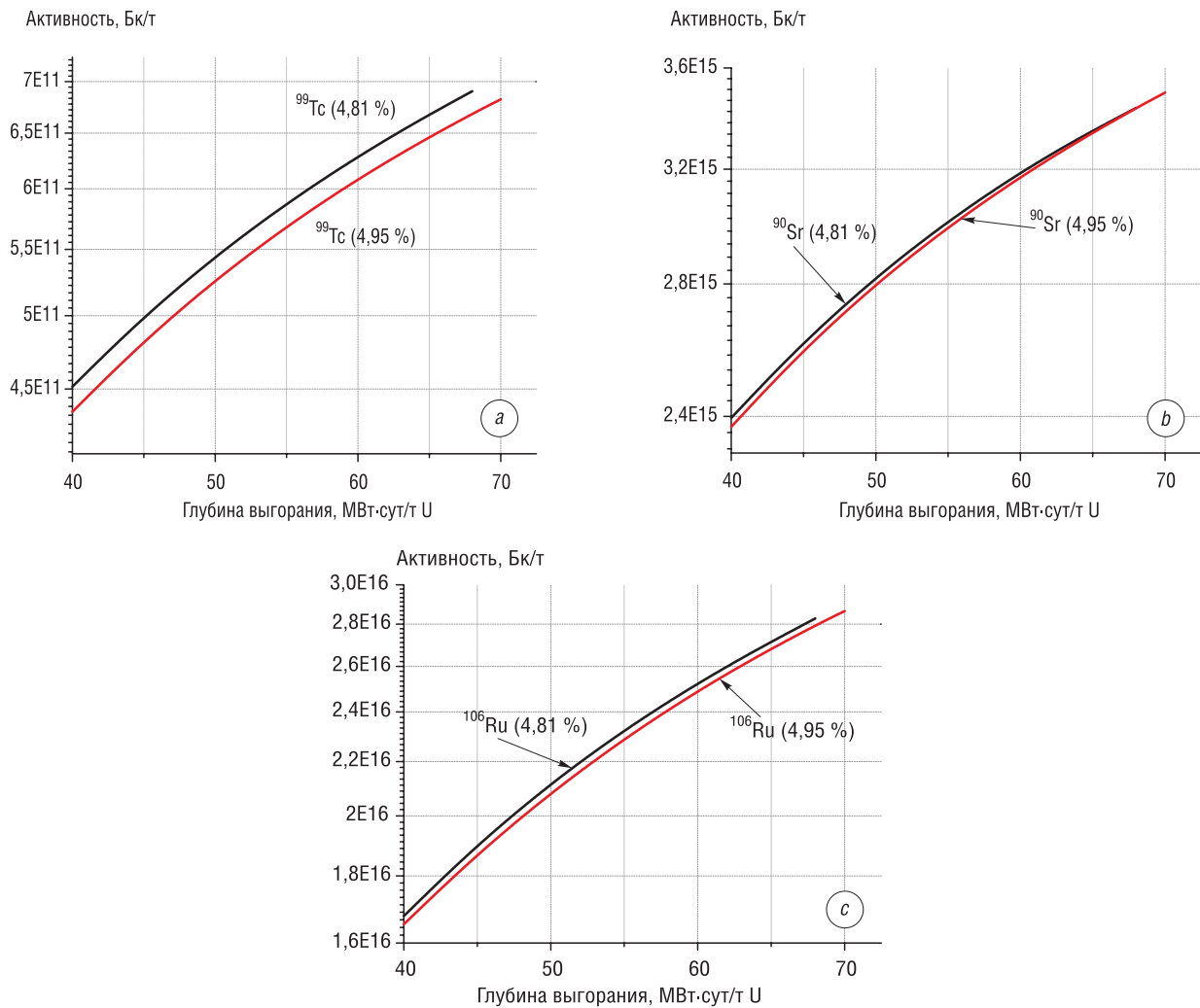


Рис. 3. Зависимости активностей ^{99}Tc (a), ^{90}Sr (b), ^{106}Ru (c) от глубины выгорания топлива
 Fig. 3. ^{99}Tc (a), ^{90}Sr (b), ^{106}Ru (c) activity dependencies from the fuel burnup

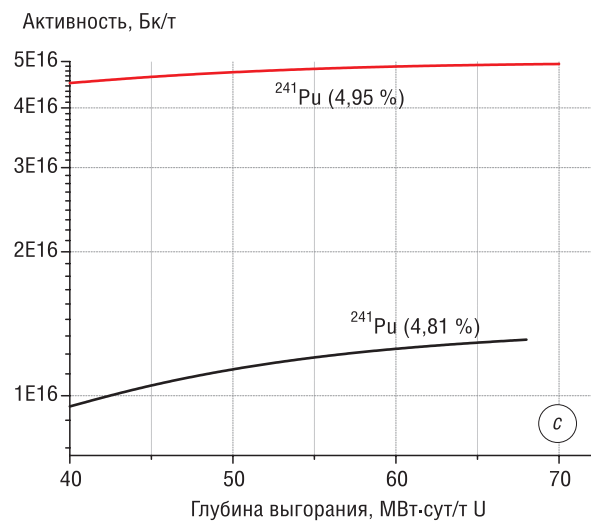
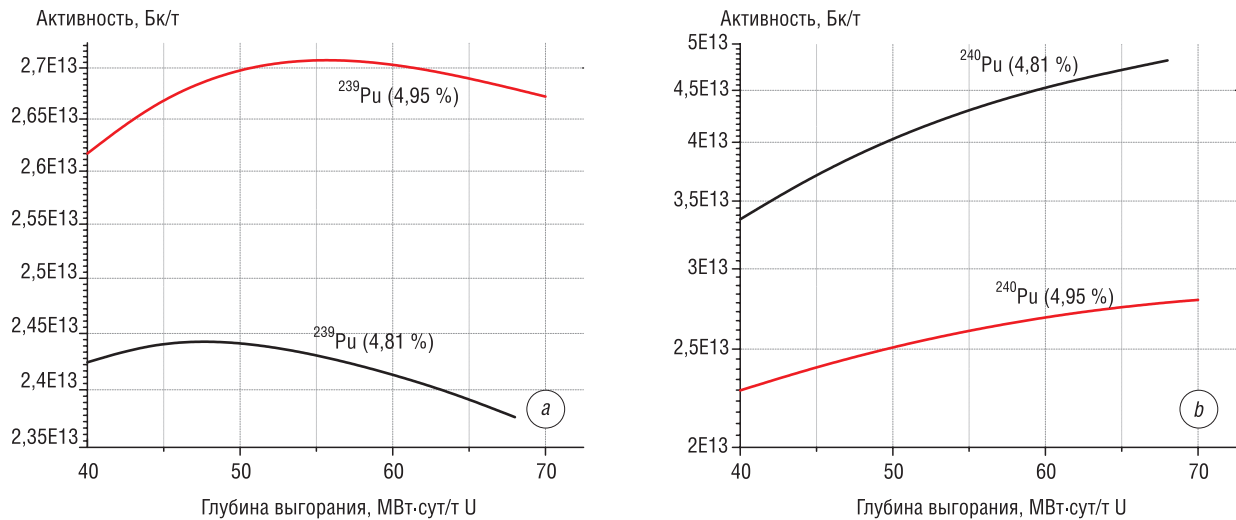
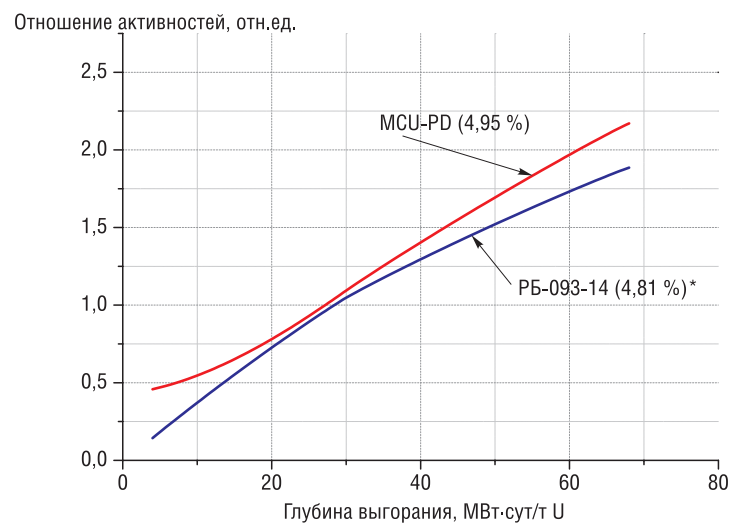


Рис. 4. Зависимости активностей ^{239}Pu (a), ^{240}Pu (b), ^{241}Pu (c) от глубины выгорания
 Fig. 4. ^{239}Pu (a), ^{240}Pu (b), ^{241}Pu (c) activity dependencies from the fuel burnup



* Для РБ-093-14 оцененная погрешность для Cs-134 и Cs-137 – 8 и 2,4 %.

Рис. 5. Цезиевое отношение активностей ($^{134}\text{Cs}/^{137}\text{Cs}$) в зависимости от глубины выгорания топлива
 Fig. 5. The ratio of ^{134}Cs to ^{137}Cs activity depending on the fuel burnup

Оценка запасов активности на разных фазах обращения с ОЯТ. Моделирование запасов активности на каждой фазе обращения с ОЯТ по каждому из радиационно опасных радионуклидов, а также суммарной активности проведено с использованием программного средства имитационного моделирования CUB с использованием процедур Монте-Карло [3]. В табл. 1 представлены результаты расчета активностей продуктов деления и актинидов в ОТВС со средней глубиной выгорания 55,6 МВт·сут/т U для топлива с начальным обогащением 4,81 %, полученные на основании референтных данных РБ-093-14.

Таблица 1. Результаты расчета активностей продуктов деления и актинидов для средней глубины выгорания 55,6 МВт·сут/т U в ОТВС с обогащением 4,81 %

Table 1. Results of calculating the activity of fission products and actinides for an average burnup of 55.6 MW·day/t U in SFA with initial enrichment of 4.81 %

Радионуклид	$T_{1/2}$	Активность на 1 ТВС, Бк/ТВС	Радионуклид	$T_{1/2}$	Активность на 1 ТВС, Бк/ТВС
^{144}Ce	285 сут	2,53E+16	^{93}Zr	$1,5 \cdot 10^6$ лет	3,19E+10
^{134}Cs	2 года	4,73E+15	$^{125\text{m}}\text{Te}$	58 сут	4,11E+13
^{135}Cs	$2,3 \cdot 10^6$ лет	1,17E+10	^{237}Np	$2,14 \cdot 10^6$ лет	1,63E+10
^{137}Cs	30 лет	2,83E+15	^{238}Pu	84,74 года	1,79E+14
^{154}Eu	8,6 лет	2,16E+14	^{239}Pu	$24,11 \cdot 10^3$ лет	1,04E+13
^{155}Eu	5 лет	8,97E+13	^{240}Pu	$6,56 \cdot 10^3$ лет	1,87E+13
^3H	12,32 года	3,37E+11	^{241}Pu	14,29 года	5,22E+15
^{85}Kr	10,8 лет	1,57E+14	^{242}Pu	$3,73 \cdot 10^5$ лет	1,10E+11
^{107}Pd	$6,5 \cdot 10^6$ лет	2,41E+09	^{234}U	$2,45 \cdot 10^5$ лет	3,31E+10
^{106}Ru	373,6 сут	1,01E+16	^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$ лет	4,64E+08
^{125}Sb	2,75 лет	1,86E+14	^{236}U	$2,34 \cdot 10^7$ лет	1,19E+10
^{79}Se	$3,56 \cdot 10^5$ лет	9,87E+09	^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$ лет	8,48E+09
^{151}Sm	90 лет	9,77E+12	^{241}Am	432,6 года	7,00E+12
$^{121\text{m}}\text{Sn}$	50 лет	3,03E+11	^{243}Am	$7,37 \cdot 10^3$ лет	1,60E+12
^{126}Sn	$2,3 \cdot 10^5$ лет	1,30E+10	^{242}Cm	162,94 сут	2,29E+15
^{90}Sr	28,8 лет	1,31E+15	^{244}Cm	18,11 года	2,81E+14
^{99}Tc	$2,11 \cdot 10^5$ лет	2,56E+11	^{245}Cm	$8,5 \cdot 10^3$ лет	1,00E+13

Результаты оценки суммарной активности продуктов деления и актинидов отработавшего топлива энергоблоков №1 и 2 (5300 ед. ОТВС) в зависимости от времени выдержки приведены в табл. 2. Расчет показал, что после динамичного снижения в течение первых сотен лет удельная активность меняется медленно и через 1000 лет достигает уровня порядка $1,77 \cdot 10^{17}$ Бк. Оцененная суммарная активность ОЯТ после выдержки 10 000 лет будет равна $3,88 \cdot 10^{16}$ Бк.

Таблица 2. Результаты расчетов темпов снижения суммарной активности ОЯТ в зависимости от времени выдержки для средней глубины выгорания 55,6 МВт·сут/т U в ОТВС с обогащением 4,81 %

Table 2. Results of the calculation of the rate of decrease in the total activity of SNF depending on the exposure time for an average burnup depth of 55.6 MW·day/t U in the SFA with an enrichment of 4.81 %

Время выдержки, годы	Суммарная активность радионуклидов, Бк
100	4,87E+18
200	9,75E+17
500	3,50E+17
1000	1,77E+17
5000	5,44E+16
10000	3,88E+16

Заключение. В поддержку перспективных экологических проектов при обращении с ОЯТ Белорусской АЭС разработаны вероятностная модель и математическая программа CUB, обеспечивающая прогноз запасов активности по перечню наиболее опасных продуктов деления и актиноидов на разных фазах обращения с ОЯТ и продуктами его переработки. Разработанная модель использована для оценки запасов и темпов снижения активности по основным радиационно опасным радионуклидам ОЯТ ВВЭР-1000. Анализ влияния начального обогащения и глубины выгорания на наработку основных радиационно опасных продуктов деления и актиноидов, образующихся в ОЯТ, показал, что референтные данные для топлива с начальным обогащением 4,81 %, полученные по материалам РБ-093-14 реакторов ВВЭР-1000, с приемлемой точностью могут быть использованы для предварительных оценок запасов активности ОЯТ Белорусской АЭС.

В дальнейшем авторами планируется подготовить референтные данные для ОЯТ с начальным обогащением топлива 4,95 % по ^{235}U и доработать базы данных «Радиационные характеристики ОЯТ Белорусской АЭС» на всю номенклатуру топлива, планируемого для использования в ядерном топливном цикле Белорусской АЭС. Полученные результаты перспективны при проведении оценки безопасности объектов хранения ОЯТ Белорусской АЭС и продуктов их переработки и предварительной оценки активности при возврате и хранении продуктов переработки ОЯТ Белорусской АЭС с учетом принципа радиационного эквивалента.

Список использованных источников

1. Status and trends in spent fuel and radioactive waste management [Electronic Resource] // IAEA nuclear energy series: NW-T-1.14. – Vienna, 2018. – Mode of access: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf
2. Вентцель, Е. С. Исследование операций / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1972. – 552 с.
3. Верификация и использование комплекса математических программ для оценки запасов радиоактивности в обеспечение безопасности ядерных установок на промплощадке АЭС [Электронный ресурс] / Н. В. Горбачева [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Подольск, 26–29 мая 2009 г. / ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – Подольск, 2009. – Режим доступа: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a76/npa-yrb-1.pdf>
4. Горбачева, Н. В. Расчетные исследования радиотоксичности и удельной активности облученного топлива ВВЭР-1200 глубокого выгорания / Н. В. Горбачева, Н. В. Кулич, Ю. А. Корчева // Ядерные технологии XXI века: докл. VI Междунар. конф., Минск, 25–27 окт. 2016 г. / ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2016. – С. 79–88.
5. Серебряный, Г. С. Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива реактора ВВЭР-1200 / Г. С. Серебряный, М. Л. Жемжуров // Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века: докл. VII Междунар. конф., Минск, 23–26 окт. 2018 г. / ОИЭЯИ – Сосны НАН Беларуси. – Минск: Право и экономика, 2018. – С. 63–89.

References

1. International Atomic Energy Agency. *Status and trends in spent fuel and radioactive waste management*. IAEA nuclear energy series: NW-T-1.14. Vienna, 2018. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P1799_web.pdf
2. Ventcel' E. S. *Operation Research*. Moscow, Nauka Publ., 1972. 552 p. (in Russian).
3. Gorbacheva N. V., Beresneva N. V., Kulich N. V., Skurat V. V. Verification and use of a set of mathematical programs for assessing radioactivity reserves to ensure the safety of nuclear installations at the NP site. *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER: materialy 6-j Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with WWER: Reports of the 6th International Scientific and Technical Conference]. Podol'sk, 2009. Available at: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a76/npa-yrb-1.pdf> (in Russian).
4. Gorbacheva N.V., Kulich N. V., Korcheva Yu. A. Calculated studies of radiotoxicity and specific activity of irradiated deep burn WWER-1200 fuel. *Yadernye tekhnologii XXI veka: doklady VI Mezhdunar. konf.* [Nuclear Technologies of the XXI century: Reports of the 6th International Conference]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2016, pp. 79–88 (in Russian).
5. Serebryanyi G. S. Radiation and thermal characteristics of spent nuclear fuel of the WWER-1200 reactor. *Atomnaya energetika, yadernye i radiacionnye tekhnologii XXI veka: doklady VII Mezhdunar. konfer.* [Nuclear Energy, nuclear and radiation technologies of the XXI Century: Reports of the 7th International Conference]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2018, pp. 63–89 (in Russian).

Информация об авторах

Корчева Юлия Александровна – младший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: julia.korchova@sosny.bas-net.by

Горбачева Наталья Владимировна – ведущий научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: harbachova.nv@sosny.bas-net.by

Кузьмина Наталья Дмитриевна – старший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by

Кулич Николай Васильевич – старший научный сотрудник, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь). E-mail: 2993826@mail.ru

Information about the authors

Julia A. Korchova – Junior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: julia.korchova@sosny.bas-net.by

Natalia V. Harbachova – Leading Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: harbachova.nv@sosny.bas-net.by

Natalia D. Kuzmina – Senior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: ndkuzmina@sosny.bas-net.by

Nikolai V. Kulich – Senior Researcher, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (P.O. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: 2993826@mail.ru

УЧЕНЫЕ БЕЛАРУСИ
SCIENTISTS OF BELARUS

АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ БЕЛЫЙ

(К 70-летию со дня рождения)



15 мая 2020 г. исполнилось 70 лет известному белорусскому ученому в области материаловедения, инженерии поверхностей, триботехники, члену-корреспонденту Национальной академии наук Беларуси, доктору технических наук, профессору Алексею Владимировичу Белому.

Алексей Владимирович родился в семье известного ученого в области материаловедения, механики металлополимерных систем трения и износа в машинах академика АН БССР Владимира Алексеевича Белого, основателя и первого директора Института механики металлополимерных систем НАН Беларуси. После окончания в 1968 г. с золотой медалью средней школы №27 г. Гомеля поступил на физический факультет Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. В 1973 г. окончил университет по специальности «Физика твердого тела» и был направлен на работу в Физико-технический институт (ФТИ) Академии наук

БССР. Вся дальнейшая жизнь Алексея Владимировича связана с этим институтом, в котором им пройден путь от стажера-исследователя до заведующего отделом пучковых и плазменных технологий, заместителя директора института по научной работе. С 1992 по 2004 г., оставаясь заведующим отделом ФТИ НАН Беларуси, работал начальником Научно-производственного отдела, а с 2002 г. – Управления научно-инновационной деятельности НАН Беларуси. С 2006 по 2009 г. – заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук НАН Беларуси.

На протяжении своей научной деятельности Алексей Владимирович внес значительный вклад в исследование физики взаимодействия заряженных частиц с поверхностными слоями твердых тел. Под его руководством разработано новое перспективное научное направление – низкоэнергетическая ионная имплантация при высоких плотностях ионного тока. В процессе работы установил ряд закономерностей структурных превращений и радиационно-стимулированной диффузии, основные механизмы повышения физико-механических свойств материалов при облучении ионными пучками высокой плотности, взаимосвязь параметров имплантации, микроструктуры и эксплуатационных характеристик поверхностей. Научные разработки явились основой для создания новых технологий инженерии поверхностей и необходимого оборудования, высокопрочных, износостойких и коррозионностойких материалов, технологических процессов их получения, оборудования.

В настоящее время основные усилия ученого направлены на решение широкого спектра проблем инженерии поверхностей материалов различного назначения с применением концентрированных потоков заряженных частиц. Основными технико-экономическими преимуществами разработанного им метода низкоэнергетической сильноточной ионной имплантации являются высокая производительность и значительное снижение стоимости оборудования, необходимого для реализации процесса, что существенно повышает конкурентоспособность метода и расширяет потенциальные возможности его применения.

Алексей Владимирович в 1990 г. защитил докторскую диссертацию, в 1995 г. ему присуждено ученое звание «профессор». В 2004 г. ученый избран членом-корреспондентом НАН Беларуси

и членом бюро Отделения физико-технических наук НАН Беларуси. Более 15 лет Алексей Владимирович является научным руководителем Государственных программ научных исследований: в 2004–2014 гг. программы «Высокоэнергетические технологии», с 2015 г. – подпрограммы «Плазменные и пучковые технологии». В рамках данных программ разработаны высокоэффективные технологические процессы получения и обработки функциональных, конструкционных, инструментальных материалов, материалов для микроэлектроники, здравоохранения; созданы конкурентоспособные образцы оборудования нового поколения и технологические процессы упрочняющей обработки и инженерии поверхностей, что обеспечило экономический и импортозамещающий эффект и годовую экономию электроэнергии, увеличение экспортных поставок оборудования.

Научная деятельность А. В. Белого высоко оценена научным сообществом и государством. В 1982 г. ученый стал лауреатом Премии Ленинского комсомола за исследование фрикционного взаимодействия конструкционных материалов с целью снижения износа, энерго- и металлоемкости машин. В 1988 г. ему была присуждена Государственная премия БССР за исследование, разработку и внедрение прогрессивных малоотходных технологических процессов холодной объемной штамповки и организацию высококорентабельного массового производства деталей автотракторного машиностроения.

Премия НАН Беларуси ученый получил в 1993 г. за монографию «Структура и методы формирования износостойких поверхностных слоев». В 1997 г. Алексей Владимирович награжден медалью Общества металлургов и материаловедов Франции, а в 2000 г. – Почетной грамотой Совета Министров Республики Беларусь.

За серию работ «Физическая мезомеханика и новые представления о контактном разрушении градиентных материалов; разработка технологий поверхностной инженерии материалов и конструкций» в 2002 г. ему была присуждена Премия НАН Беларуси и Сибирского отделения РАН им. академика В. А. Коптюга.

А. В. Белый является автором свыше 330 печатных работ, в том числе 9 монографий, 44 авторских свидетельств и патентов на изобретения. Накопленный опыт Алексей Владимирович передает студентам, читая курсы лекций на приборостроительном факультете Белорусского национального технического университета. Ученый активно участвует в подготовке кадров высшей квалификации: под его научным руководством успешно защищаются диссертации, в настоящее время Алексей Владимирович является членом Президиума Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь.

Высокий профессионализм и организаторские способности, принципиальность и тактичность, сочетание прекрасных человеческих качеств – общительность, внимательное отношение к людям, позволили Алексею Владимировичу снискать авторитет эрудированного собеседника, чуткого и доброжелательного человека, талантливого ученого. Мы искренне поздравляем Алексея Владимировича с юбилеем, желаем ему крепкого здоровья, жизненной энергии, благополучия и осуществления всех творческих замыслов

*Отделение физико-технических наук НАН Беларуси,
Физико-технический институт НАН Беларуси*

ПАМЯТИ СТЕПАНА СТЕПАНОВИЧА ПЕСЕЦКОГО



8 апреля 2020 г. ушел из жизни член-корреспондент НАН Беларуси, доктор технических наук, профессор Степан Степанович Песецкий.

Родился С.С. Песецкий в д. Алексейки Ивацевичского района Брестской области. В 1971 г. окончил факультет технологии органических веществ Белорусского технологического института имени С.М. Кирова (Минск) по специальности «Технология и переработка пластических масс и стеклопластиков» и поступил на работу в Институт механики металлополимерных систем (ИММС) АН БССР. Всю свою научную жизнь Степан Степанович провел в этом институте, где прошел путь от мастера участка по переработке пластмасс до заведующего отделом «Технология полимерных композитов» (2004 г.).

Уже в начале своего трудового пути С.С. Песецкий зарекомендовал себя как грамотный, целеустремленный исследователь. В 1975 г. молодой ученый поступает в аспирантуру ИММС с отрывом от производства. В 1980 г. он успешно защитил кандидатскую диссертацию в Рижском политехническом институте по теме «Исследование литевых адгезионных соединений полиамидов с металлами», а в 1992 г. – докторскую диссертацию в специализированном совете при ИММС АН Беларуси на тему «Разработка металлополимерных и смесевых полимерных машиностроительных материалов на основе гетероцепных термопластов». За большой личный вклад в подготовку высококвалифицированных специалистов в 2000 г. Степану Степановичу присвоено ученое звание профессора по специальности «Технология».

Важнейшие качества Степана Степановича как специалиста высочайшего уровня – отличная фундаментальная подготовка, опыт работы на производстве, невероятная работоспособность, преданность науке и ИММС НАН Беларуси. Эти качества позволили достичь ему мирового признания, востребованности его разработок в различных отраслях промышленности. Успехи в научной сфере были высоко оценены научной общественностью, и в 2014 г. ученый был избран членом-корреспондентом НАН Беларуси по специальности «Полимерные материалы и технологии».

Основное внимание С.С. Песецкого было сосредоточено на решении задач по созданию полимерных композиционных материалов, востребованных промышленностью Республики Беларусь. Под его руководством и при непосредственном участии в НАН Беларуси стали развиваться перспективные направления современной науки о полимерах: технология и физико-химия полимерных смесей; научные основы материаловедения термопластичных композиционных материалов конструкционного назначения – армированных пластиков, трудногорючих (самозатухающих) композитов, а также функционализированных полиолефинов, термопластичных эластомеров и полимерных нанокомпозитов. К числу важнейших полученных талантливым исследователем научных результатов теоретического и прикладного значения следует отнести: разработку научных основ технологии высокопрочных адгезионных соединений термопластичных полимеров с металлами; результаты изучения межфазных взаимодействий и релаксационных явлений, реологического поведения и фазово-структурных превращений в многокомпонентных полимер-полимерных системах, новые данные в области молекулярной структуры полимеров, ее изменений при формировании и переработке; результаты исследований в области технологии и физико-химии функционализированных полимеров и сополимеров олефинов, новые данные о структуре и свойствах полимерных нанокомпозитов.

На этой научной базе впервые на территории стран СНГ разработан и освоен в опытно-промышленном масштабе технологический процесс получения функционализированных полимеров и сополимеров олефинов методом реакционной экструзии. Впервые в Республике Беларусь разработана и внедрена в производство экономически выгодная совмещенная экструзионно-прессовая технология получения крупногабаритных пластмассовых изделий. Разработаны импортозамещающие и экспортоориентированные высоковязкие суперударопрочные полиамидные композиты для переработки методами непрерывной экструзии (по трубным технологиям) и экструзии с раздувом, используемые для изготовления гибких труб пневматических систем тракторов «Беларус» (ОАО «МТЗ», Минск) и комбайнов (ОАО «Гомсельмаш», Гомель), сепараторов паров бензина для ОАО «АВТОВАЗ» (Тольятти, Россия). С. С. Песецким впервые в Беларуси разработаны новые типы конкурентоспособных полиэфирных композитов конструкционного назначения на основе полиэтилентерефталата для производства электроизоляторов на напряжения до 10 кВ. Уникальными разработками являются многофункциональные компатибилизаторы, антипирирующие добавки и другие аддитивы для полимерных материалов. Освоены серийные поставки разработанных композитов и готовой продукции.

Степан Степанович – автор более 440 научных трудов. Результаты теоретических и научно-практических исследований ученого опубликованы в ведущих периодических зарубежных изданиях. Свыше 200 научных статей увидели свет в академических журналах Республики Беларусь, Российской Федерации, Украины, а также международных периодических изданиях в области науки о полимерах. С. С. Песецкий выступил соавтором в 11 коллективных монографиях. Новизна его технических разработок защищена более чем 150 авторскими свидетельствами и патентами.

Личный вклад ученого в развитие отечественной науки отмечен множеством различных наград. Так, в 1975 г. С. С. Песецкий становится лауреатом премии Ленинского комсомола Белоруссии в области науки и техники «За исследование физико-химических явлений при изготовлении и эксплуатации полимерных и металлополимерных деталей», в 2008 г. – премии Национальной академии наук Беларуси, награжден нагрудным знаком отличия имени В. М. Игнатовского НАН Беларуси (2019), Почетными грамотами Совета Министров Республики Беларусь (2012), Национальной академии Беларуси (1998), концерна «Белнефтехим» (1999, 2017), Государственного комитета по науке и технологиям Республики Беларусь (2005) и др.

Светлая память о Степане Степановиче Песецком навсегда сохранится в сердцах его учеников, коллег, всех тех, кто его знал и трудился рядом с ним.

*Отделение физико-технических наук НАН Беларуси,
Институт механики металлополимерных систем
имени В. А. Белого НАН Беларуси,
коллеги, друзья*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

I. Статьи о результатах работ, проведенных в научных учреждениях, должны иметь разрешение на опубликование (сопроводительное письмо ректората или дирекции соответствующего института либо выписку из протокола заседания ученого совета, отдела или кафедры, а также акт экспертизы).

II. Статья предоставляется в редакцию в двух экземплярах на белорусском, русском или английском языках; шрифт – Times New Roman, кегль – 11 (в том числе в формулах); межстрочный интервал – 1,5. Занумерованные формулы выключаются в отдельную строку. В тексте не допускаются рукописные вставки и вклейки. Статья должна быть подписана всеми авторами.

III. Статья должна иметь следующую структуру:

1. Индекс по Универсальной десятичной классификации (УДК); инициалы и фамилии авторов; полное наименование учреждений, где работают авторы, с указанием города и страны, название статьи.

2. Аннотация (авторское резюме) объемом 150–250 слов должна кратко представлять результаты работы и быть понятной, в том числе и в отрыве от основного текста статьи; быть информативной, хорошо структурированной (один из вариантов написания аннотации – краткое повторение структуры статьи, включающее введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение или выводы).

3. Ключевые слова – набор слов, отражающих содержание текста в терминах объекта, научной отрасли и методов исследования; рекомендуемое количество ключевых слов 5–10.

4. Метатекстовые данные (все то, что предшествует основному тексту статьи) приводятся *на английском языке*, причем аннотация должна быть оригинальной (т. е. не являться дословным переводом русскоязычной аннотации). Если статья англоязычная – вышеуказанные данные приводятся на русском (белорусском) языке.

5. Основной текст статьи не должен превышать 16 с. (т. е. около 40 тыс. знаков); в этот объем также входят таблицы и рисунки (до 7–8). Материал должен быть четко структурированным: введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение (выводы). В русско- и белорусскоязычных статьях рекомендуется делать подрисуночные подписи и надписи на самих иллюстрациях на двух языках – *русском (белорусском) и английском*.

6. Список использованной литературы (не более 40 ссылок) оформляется в соответствии с требованиями Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь (ГОСТ 7.1-2003). Цитируемая литература приводится общим списком по мере упоминания, ссылки в тексте даются порядковым номером в квадратных скобках (напр., [1]); ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

7. Список цитированных источников приводится *в романском алфавите* (латиница) – «References» – со следующей структурой: авторы (транслитерация), название статьи в транслитерированном варианте [перевод названия статьи на английский язык в квадратных скобках],

название русскоязычного источника (транслитерация) [перевод названия источника на английский язык – парафраз (для журналов можно не делать)], выходные данные с обозначениями на английском языке.

8. Если присутствует информация о финансировании (поддержке грантами проектов и т. п.), ее следует давать на русском (белорусском) и английском языках под заголовком «Благодарности» («Падзякі», «Acknowledgements»).

IV. Для подготовки метаданных (так называемый информационный лист) на отдельной странице следует указать *на русском (белорусском) и английском языках* для каждого автора: фамилию, имя и отчество (полностью), ученую степень, звание, должность, место работы с указанием адреса, контактную информацию (e-mail, ORCID, телефоны).

V. Электронный вариант статьи предоставляется на диске, флэшке, присылается по электронной почте в редакцию журнала – ftvesti@mail.ru, загружается на сайт журнала (vestift.belnauka.by). Текст должен быть набран в Word под Windows, формулы – в редакторе MathType. Собственным редактором формул версий Microsoft Office 2007 и выше пользоваться нельзя, так как в редакционно-издательском процессе он не поддерживается. Вставку символов выполнять через меню «Вставка\Символ». Выключку вверх и вниз (C^2 , C_4) выполнять через меню «Формат\Шрифт\Верхний индекс», «Формат\Шрифт\Нижний индекс». Латинские буквы необходимо набирать *курсивом*, греческие – прямо (для набора греческих символов следует пользоваться гарнитурой Symbol). Обозначения математических функций (lim, sup, ln, sin, Re, Im и т. п.), символы химических элементов (N, Cl) также набираются прямым шрифтом.

VI. Черно-белые и цветные рисунки вставляются в текст статьи (Word), а также даются в виде отдельных файлов в формате tif (600 точек на дюйм). Желательно также предоставлять их в формате оригинала (Corel, диаграммы в Excel, Origin Pro и т. д.), т. е. в той программе, в которой они выполнены. Текст на рисунках набирается основной гарнитурой, причем начертание символов (греческое, латинское) должно соответствовать их начертанию в тексте. Размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 8 пунктов). На обороте рисунков (если они даются отдельно) указываются фамилии авторов, название статьи. Фотографии предоставляются в виде файлов (tif, jpg, png, eps) и в распечатанном виде.

VII. Поступившая в редакцию статья направляется на рецензию, затем визируется членом редколлегии. Основным критерием целесообразности публикации является новизна и информативность статьи. Если по рекомендации рецензента статья возвращается автору на доработку, то переработанная рукопись вновь рассматривается редколлегией. Статьи не по профилю журнала возвращаются авторам после заключения редколлегии. Оформленные не по правилам статьи редакцией не принимаются.

Материалы для публикации следует направлять по адресу:
ул. Академическая, 1, к. 118, редакция журнала «Весці НАН Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук»,
220072, г. Минск, Республика Беларусь, телефон для справок: +375 17 284 02 45, либо по электронной почте: ftvesti@mail.ru,
либо через онлайн-форму на сайте vestift.belnauka.by.