

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай

АКАДЭМІі НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2024. Т. 69, №1

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ

АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2024. Т. 69, №1

Журнал основан в 1956 г. как «Весці Акадэміі навук БССР.
Серія фізіка-тэхнічных навук», с 1992 г. – «Весці Акадэміі навук Беларусі.
Серія 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)*

Главный редактор

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Редакционная коллегия

С. С. Щербаков – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
(заместитель главного редактора)

И. А. Старостина (ведущий редактор журнала)

Д. Басаран – Университет Буффало, Буффало, Соединенные Штаты Америки

П. А. Витязь – Управление аэрокосмической деятельности аппарата Национальной академии наук
Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Дзефэн Ван – Юго-Западный университет Цзяотун, Чэнду, Китайская Народная Республика

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

В. В. Зильбершмидт – Международный центр виброударных систем, Школа механического,
электрического и технологического машиностроения им. Вольфсона Университета Лафборо, Лафборо,
Великобритания

А. Ф. Ильющенко – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь

Б. Каталинич – Центрально-Европейское отделение Международной инженерной академии, Вена, Австрийская Республика

М. Консари – Университет штата Луизиана, Батон-Руж, Соединенные Штаты Америки

С. М. Костромицкий – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

А. Г. Кравцов – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

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

А. П. Ласковнѳ – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

А. М. Маляревич – Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В. П. Маркевич – Институт фотоники Университета г. Манчестер, Манчестер, Великобритания

Н. А. Махутов – Институт машиноведения имени А. А. Благодногов Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

В. В. Митюшев – Краковский политехнический университет им. Тадеуша Костюшко, Краков, Республика Польша

Н. К. Мышкин – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь

Нгуен-Ву Тронг – Национальный институт прикладной механики и информатики Вьетнамской академии наук и технологий, Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам

С. В. Панин – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация

О. Г. Пенязьков – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Л. Танович – Белградский университет, Белград, Республика Сербия

В. М. Федосюк – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь

М. Л. Хейфец – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Шуньин Ци – Совместный институт Даляньского политехнического университета и Белорусского государственного университета, Далянь, Китайская Народная Республика

Адрес редакции:

ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.

Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru

vestift.belnauka.by

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2024. Т. 69, № 1

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*

Компьютерная верстка *Н. И. Каууба*

Подписано в печать 15.03.2024. Выход в свет 27.03.2024. Формат 60 × 84¹/₈. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 66 экз. Заказ 53.

Цена номера: индивидуальная подписка – 13,34 руб., ведомственная подписка – 31,28 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, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука».

Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2024

PROCEEDINGS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2024, vol. 69, no. 1

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

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

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

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

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

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

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

Sergei S. Sherbakov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
(*Deputy Editor-in-Chief*)

Irina A. Starostsina (*lead editor*)

Cemal Basaran – University of Buffalo, Buffalo, United States of America

Pyotr A. Vityaz – Department of Aerospace Activities of the National Academy of Sciences of Belarus,
Minsk, Republic of Belarus

Zefeng Wang – Southwest Jiaotong University, Chengdu, People’s Republic of China

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

Vadim V. Silberschmidt – International Centre of Vibro-Impact Systems, Wolfson School of Mechanical
and Manufacturing Engineering at Loughborough University, Loughborough, United Kingdom

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

Branko Katalinic – Central-European Branch of the International Engineering Academy, Vienna, Republic
of Austria

Michael Khonsari – Louisiana State University, Baton Rouge, United States of America

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

Alexander G. Kravtsov – Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic
of Belarus

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

Alexander P. Laskovnev – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

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

Vladimir P. Markevich – Photon Science Institute and School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester, United Kingdom

Nikolay A. Makhutov – Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

Vladimir V. Mityushev – Cracow University of Technology, Krakow, Republic of Poland

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

Nguyen-Vu Truong – National Institute of Applied Mechanics and Informatics, Vietnam Academy of Science and Technology, Ho Chi Minh City, Socialist Republic of Vietnam

Sergey V. Panin – Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

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

Lyubodrag Tanovich – University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia

Valery M. Fedosyuk – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Mikhail L. Kheifetz – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Shunying ji – Joint Institute of Dalian University of Technology and Belarusian State University, Dalian, People's Republic of China

Address of the Editorial Office:

I, Akademicheskaya Str., room 118, 220072, Minsk, Republic of Belarus.

Tel.: +375 17 374-02-45; e-mail: ftvesti@mail.ru

vestift.belnauka.by

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2024, vol. 69, no. 1

Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*

Computer imposition *N. I. Kashuba*

It is sent of the press 15.03.2024. Appearance 27.03.2024. Format $60 \times 84^{1/8}$. Offset paper. The press digital.

Printed pages 10.23. Publisher's signatures 11.3. Circulation 66 copies. Order 53.

Number price: individual subscription – 13.34 byn., departmental subscription – 13.28 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. Skaryna Str., Minsk, 220084, Republic of Belarus.

© Formalization. RUE "Publishing House "Belaruskaya navuka",
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2024

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

- Серокурова А. И., Шарко С. А., Новицкий Н. Н.** СВЧ-гетероструктуры в виде субмикронных пленок $Y_3Fe_5O_{12}$ на неориентированных подложках сегнетоэлектрической керамики: синтез, свойства и перспективы применения 7
- Бойправ О. В., Белоусова Е. С., Богущ Н. В., Саванович С. Э., Касперович М. М., Гусинский А. В., Захаров И. А.** Углеродсодержащие поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с рельефной поверхностью 17

МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

- Базров Б. М., Хейфец М. Л.** Метод повышения производственной технологичности конструкции изделия 28

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

- Жемжуров М. Л., Жмура Г. М., Рубин И. Е., Днепровская Н. М., Тетерева Н. А., Руденков И. В., Бабичев Л. Ф.** Определение объемов радиоактивных отходов в активированных реакторных конструкциях ВВЭР-1200 39

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

- Наумов А. О., Хмарский П. А., Бышнев Н. И., Петровский Н. А.** Определение концентрации электронов в ионосфере над территорией Республики Беларусь по данным глобальных навигационных спутниковых систем (на английском языке) 53

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Лаптев А. Б., Коган А. М., Николаев Е. В., Рогачев А. А., Игнатович Ж. В., Матвеев Ю. В.** Математическое моделирование процессов получения и старения полимерных композиционных материалов 65

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

- Леонтьева Т. Г., Москальчук Л. Н., Баклай А. А., Маковская Н. А.** Анализ влияния алюмосиликатных сорбентов на иммобилизацию ^{137}Cs в цементном компаунде и его механическую прочность 76

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**CONTENTS****MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY**

- Serokurova A. I., Sharko S. A., Novitskii N. N.** Microwave heterostructures in the form of submicron $Y_3Fe_5O_{12}$ films on non-oriented ferroelectric ceramic substrates: synthesis, properties, and prospects for applications 7
- Boiprav O. V., Belousova E. S., Bogush N. V., Savanovich S. E., Kasperovich M. M., Gusinsky A. V., Zakharov I. A.** Charcoal-containing microwave electromagnetic radiation absorbers with relief surface 17

MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS

- Bazrov B. M., Kheifetz M. L.** Method of improving the production manufacturability of the product design 28

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F.** Determination of volume of radioactive waste in activated VVER-1200 reactor structures. 39

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

- Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Byshnev N. I., Piatrouski M. A.** Determination of total electron content in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus based on global navigation satellite systems data 53

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Laptev A. B., Kogan A. M., Nikolaev E. V., Rogachev A. A., Ihnatovich Zh. V., Matveenko Yu. V.** Mathematical modeling of the creation process and aging of polymer composite materials. 65

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

- Leontieva T. G., Maskalchuk L. N., Baklay A. A., Makovskaya N. A.** Analysis of the influence of the aluminosilicate sorbents on the immobilization of ^{137}Cs in the cement compound and its mechanical strength 76

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-7-16>
УДК 537.635:538.935:539.216:621.793.18



Оригинальная статья

А. И. Серокурова*, С. А. Шарко, Н. Н. Новицкий

*Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь*

**СВЧ-ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ В ВИДЕ СУБМИКРОННЫХ ПЛЕНОК $Y_3Fe_5O_{12}$
НА НЕОРИЕНТИРОВАННЫХ ПОДЛОЖКАХ СЕГНЕТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
КЕРАМИКИ: СИНТЕЗ, СВОЙСТВА И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ**

Аннотация. Получены монолитные структуры железо-иттриевого граната (YIG, $Y_3Fe_5O_{12}$) толщиной около 2 мкм на сегнетоэлектрических керамических подложках на основе $PbZr_{0.45}Ti_{0.55}O_3$ (PZT) и $Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO_3$ (BST). Слой $Y_3Fe_5O_{12}$ был нанесен методом ионно-лучевого распыления-осаждения на подложки толщиной 400 мкм путем распыления поликристаллической мишени состава $Y_3Fe_5O_{12}$ ионами аргона. Гетероструктуры кристаллизовались отжигом на воздухе при температуре 820 °С в течение 5 мин. Результаты применения метода характеристического рентгеновского излучения показали, что элементный состав монолитной гетероструктуры соответствует заданному. В ходе рентгеновских исследований установлено, что процесс кристаллизации YIG завершен и полученная структура является однофазной. Результаты магнитных исследований и исследований методом ферромагнитного резонанса говорят о возможности использования полученных гетероструктур в логических схемах на основе спиновых волн с малым рассеиванием, в элементах памяти, а также в электрически управляемых устройствах СВЧ-диапазона.

Ключевые слова: феррит-гранатовые слои, сегнетоэлектрическая подложка, буферный слой, поликристаллическая структура, ионно-лучевое распыление

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T22M-001).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Серокурова Александра Ивановна** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: aleksa.serokurova@yandex.by; *Шарко Сергей Александрович* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: sharko@physics.by; *Новицкий Николай Николаевич* – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: novitski@ifftp.bas-net.by

Вклад авторов: *Серокурова Александра Ивановна* – разработка методологии исследования, написание и оформление текста рукописи, подготовка образцов, интерпретация результатов, обобщение результатов исследования; *Шарко Сергей Александрович* – обоснование концепции исследования, интерпретация результатов, редактирование текста рукописи, формулировка выводов; *Новицкий Николай Николаевич* – разработка методологии исследования, подготовка образцов, работа с графическим материалом, интерпретация результатов.

Для цитирования: Серокурова, А. И. СВЧ-гетероструктуры в виде субмикронных пленок $Y_3Fe_5O_{12}$ на неориентированных подложках сегнетоэлектрической керамики: синтез, свойства и перспективы применения / А. И. Серокурова, С. А. Шарко, Н. Н. Новицкий // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 7–16. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-7-16>

Поступила в редакцию: 22.06.2023

Доработанный вариант: 15.12.2023

Утверждена к публикации: 22.02.2024

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

Aleksandra I. Serokurova*, Sergei A. Sharko, Nikolay N. Novitskii

*Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus,
19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus***MICROWAVE HETEROSTRUCTURES IN THE FORM OF SUBMICRON $Y_3Fe_5O_{12}$ FILMS
ON NON-ORIENTED FERROELECTRIC CERAMIC SUBSTRATES: SYNTHESIS, PROPERTIES,
AND PROSPECTS FOR APPLICATIONS**

Abstract. In the work monolithic structures of yttrium iron garnet (YIG, $Y_3Fe_5O_{12}$) with a thickness of about 2 μm were obtained on ferroelectric ceramic substrates based on $PbZr_{0.45}Ti_{0.55}O_3$ (PZT) and $Ba_{0.4}Sr_{0.6}TiO_3$ (BST). The $Y_3Fe_5O_{12}$ layer was deposited by ion beam sputtering deposition on substrates 400 μm thick by sputtering a polycrystalline $Y_3Fe_5O_{12}$ target with with argon ions. The heterostructures were crystallized by annealing in air at a temperature of 820 $^{\circ}\text{C}$ for 5 min. The results of the characteristic X-ray radiation method showed that the elemental composition of the monolithic heterostructure corresponds to the specified one. During X-ray studies, it was found that the YIG crystallization process is completed and the resulting structure is single-phase. The results of magnetic and ferromagnetic resonance studies indicate the possibility of using the obtained heterostructures in logic circuits based on spin waves with low scattering, in memory elements, as well as in electrically controlled microwave devices.

Keywords: ferrite-garnet layers, ferroelectric substrate, buffer layer, polycrystalline structure, ion-beam sputtering-deposition

Acknowledgments: the work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project T22M-001).

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Aleksandra I. Serokurova** – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: serokurova@ifftp.bas-net.by; *Sergei A. Sharko* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: sharko@physics.by; *Nikolay N. Novitskii* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher at Scientific-Practical Materials Research Centre of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: novitski@ifftp.bas-net.by

Contribution of the authors: *Aleksandra I. Serokurova* – methodology, writing and formatting of the text of the manuscript, sample preparation, interpretation of the results, supervision, review and editing; *Sergei A. Sharko* – methodology, interpretation of the results, conceptualization, supervision, review and editing; *Nikolay N. Novitskii* – methodology, sample preparation, visualization, interpretation of the results.

For citation: Serokurova A. I., Sharko S. A., Novitskii N. N. Microwave heterostructures in the form of submicron $Y_3Fe_5O_{12}$ films on non-oriented ferroelectric ceramic substrates: synthesis, properties, and prospects for applications. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 7–16 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-7-16>

Received: 22.06.2023

Modified version: 15.12.2023

Approved for publication: 22.02.2024

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. Интенсивное развитие средств связи, телекоммуникаций, навигации и радиолокации в последние годы предъявляет повышенные требования к характеристикам приборов обработки СВЧ-сигнала (резонаторам, фильтрам, фазовращателям, линиям задержки и др.). Основные тенденции связаны с увеличением добротности устройств, снижением потерь и собственных шумов, возможностью электронной перестройки по частоте, фазе и времени задержки [1].

Множество устройств СВЧ, построенных на ферромагнитных материалах, работают в широком диапазоне частот. В основе широкого распространения ферромагнитных устройств лежат особенности волновых процессов в намагниченных монокристаллических пленках феррита, а именно распространение длинноволновых спиновых волн. Преимуществами таких волн являются низкие потери на распространение, разнообразие дисперсионных характеристик, а также низкие фазовая и групповая скорости, позволяющие реализовывать большое разнообразие миниатюрных СВЧ-устройств. Электронное управление существующими устройствами производится за счет изменения напряженности магнитного поля. Данный способ перестройки связан с необходимостью изменения тока в катушках электромагнита, а следовательно, основными недостатками выступают потребляемая мощность и габариты. Другим возможным способом электронного управления, присущим сегнетоэлектрическим материалам и устройствам на их основе, является перестройка за счет изменения электрического поля [1].

Новый актуальный тип СВЧ-материалов, обладающий мультиферроидными свойствами, построен на базе гетероструктур феррит/сегнетоэлектрик и перспективен для получения на их основе устройств стрейнтроники [1, 2]. Сочетание в одной и той же слоистой структуре феррита и сегнетоэлектрика позволяет управлять рабочими характеристиками СВЧ-устройств с помощью как магнитного, так и электрического полей.

Особый интерес при создании композитных мультиферроидных структур для устройств стрейнтроники СВЧ-диапазона представляют структуры на основе тонких пленок железо-иттриевого граната (YIG) [1, 2]. Спиновые волны с различными типами дисперсионных характеристик могут распространяться в этих структурах из-за низкого коэффициента затухания [3, 4]. Наличие в YIG магнитоупругих свойств с одной стороны и рекордно низкие скорости релаксации намагниченности – с другой позволяют управлять фазой, временем задержки, полосой фильтрации в композитных мультиферроидных структурах на основе YIG, а также бистабильностью спиновых волн.

В [5] получена двуслойная композитная структура YIG на сегнетоэлектрической керамической подложке на основе $\text{PbZr}_{0,45}\text{Ti}_{0,55}\text{O}_3$ (PZT-подложке), описаны ее свойства и перспективы применения. Однако большинство существующих в настоящее время методов формирования таких структур основано на механическом соединении слоев. Существенными недостатками данных слоистых структур является то, что они не поддаются жидкостному травлению, не чувствительны к воздействию сухой плазмы и очень быстро деградируют при термоциклировании. Эти недостатки принципиальны и не допускают возможности обработки таких структур методами микроэлектроники.

Исходя из этого остается открытым вопрос разработки технологии получения композитных мультиферроидных структур методом ионно-лучевого распыления-осаждения [6, 7]. Ранее в [8–10] была показана возможность получения слоев YIG на полупроводниковых подложках GaAs, Si, GaN с помощью указанного метода. Обычно высококачественные эпитаксиальные феррит-гранатовые пленки из-за небольшого рассогласования решетки ($\approx 0,06\%$) между YIG и материалами подложки получают методом жидкофазной эпитаксии (LPE) на подложках из гадолиний-галлиевого граната (GGG). Ранее было показано [8–10], что слои железо-иттриевого граната на кремниевых и кварцевых подложках имеют сравнительно низкое структурное совершенство по причине значительного рассогласования решетки и разных коэффициентов термического расширения между $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ и Si.

Эти факты исключают эпитаксиальный рост слоев YIG непосредственно на PZT-подложке. Однако если удастся разделить процессы осаждения и кристаллизации и создать антидиффузионный слой на поверхности подложки, предотвращая побочные реакции во время отжига, но обеспечивая хорошую адгезию к ее поверхности, то получение высококачественных поликристаллических слоев YIG будет вполне возможным.

Так, в [11] были получены структуры Co/TiO_2 на подложках GaAs и Si. При этом показано, что применение антидиффузионного слоя TiO_2 предотвращает протекание нежелательных химических реакций и в то же время сохраняет химическую индифферентность подложки по отношению к осаждаемому слою в процессе кристаллизации.

Цель работы – получение методом ионно-лучевого распыления-осаждения монокристаллических слоев железо-иттриевого граната (YIG) на сегнетоэлектрических подложках свинецсодержащей PZT-подложки и бессвинцовой керамики BST.

Экспериментальная часть. Керамические подложки на основе цирконат-титаната свинца (PZT) и твердых растворов титаната бария–стронция (BST) были синтезированы стандартным методом измельчения и горячего прессования [12]. Подложки были утонены до 400 мкм механическим полированием до субмикронной шероховатости поверхности и обработаны в кислородной плазме СВЧ-разряда. На предварительном этапе на поверхность подложек воздействовали низкоэнергетическими ионами кислорода в течение 20 мин.

Для образцов керамики PZT, содержащей химически активный летучий оксид свинца, необходимо разделить процессы осаждения и кристаллизации и создать антидиффузионный слой на поверхности подложки, предотвращая побочные реакции во время отжига, но обеспечивая хорошую адгезию к ее поверхности. Образцы PZT были подвергнуты ионно-лучевой планаризации [13]

для обеспечения наноразмерной шероховатости керамической поверхности и для создания буферного слоя TiO_2 .

Планаризация проводилась в два этапа. На первом этапе барьерный слой TiO_2 толщиной около 0,2 мкм осаждался на керамическую подложку посредством распыления мишени Ti ионами O^+ с энергиями 1,6 кэВ. Затем поверхность с барьерным слоем распылялась в более мягком режиме теми же ионами с энергиями 0,4 кэВ в течение времени, немного превышающем время осаждения слоя TiO_2 . Цикл планаризации повторялся 2 раза. Затем осаждался слой YIG путем распыления поликристаллической мишени YIG при комнатной температуре смесью ионов аргона и кислорода с энергией 1,5 кэВ при плотности тока $0,2 \text{ mA/cm}^2$ и давлении $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$. Толщина аморфного слоя YIG составила около 1 мкм. Его кристаллизовали отжигом на воздухе при температуре $820 \text{ }^\circ\text{C}$ в течение 5 мин [13].

Известно, что для бессвинцовых, более химически инертных BST-подложек необходимо создать на поверхности керамики переходной слой, родственной YIG, благодаря которому удастся предотвратить взаимодействие ферромагнитного слоя с сегнетоэлектрической подложкой и обеспечить хорошую адгезию слоя YIG к поверхности подложки. Поэтому получение монолитной гетероструктуры проводилось в два этапа при тех же режимах, что и для керамики PZT. На первом этапе наносился слой $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ толщиной около 0,5 мкм, затем его кристаллизовали отжигом, после чего поверхность с кристаллизованным слоем распылялась в том же режиме до его толщины около 100 нм. На втором этапе процесс напыления YIG и его отжига повторялся в тех же режимах.

Слои были однородными по толщине с точностью до 10 % на площади до 10 см^2 , а их катионный состав совпадал со стехиометрическим составом мишени с точностью до 5 % [12].

Характеристики полученных таким образом гетероструктур исследовались с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) на приборе FEI Helios NanoLab 600 (США). Образцы в поперечном сечении были получены по стандартной методике с использованием сфокусированных пучков ионов галлия с энергией 30 кэВ. Рентгеновские исследования осуществлялись на дифрактометре Bruker D8 Advance (Германия) с использованием CuK_α -излучения с длиной волны $1,5405 \text{ \AA}$. Рентгенограммы получены в диапазоне углов 2θ $15\text{--}80^\circ$. Каждое измерение проводилось с шагом $0,0133^\circ$ в течение 3 с. Идентификация фаз осуществлялась с использованием Базы данных неорганических кристаллических структур (ICSD). Вибрационный магнитометр универсальной автоматизированной установки Liquid Helium Free High Field Measurement System (Cryogenic LTD, Великобритания) применялся для магнитных исследований гетероструктур в диапазоне магнитных полей $\pm 1 \text{ Тл}$ при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 показано поперечное сечение гетероструктур YIG/ TiO_x /PZT (a) и естественный скол YIG/BST (b). Слой YIG является поликристаллическим и состоит из монокристаллических блоков с характерным размером до 2 мкм.

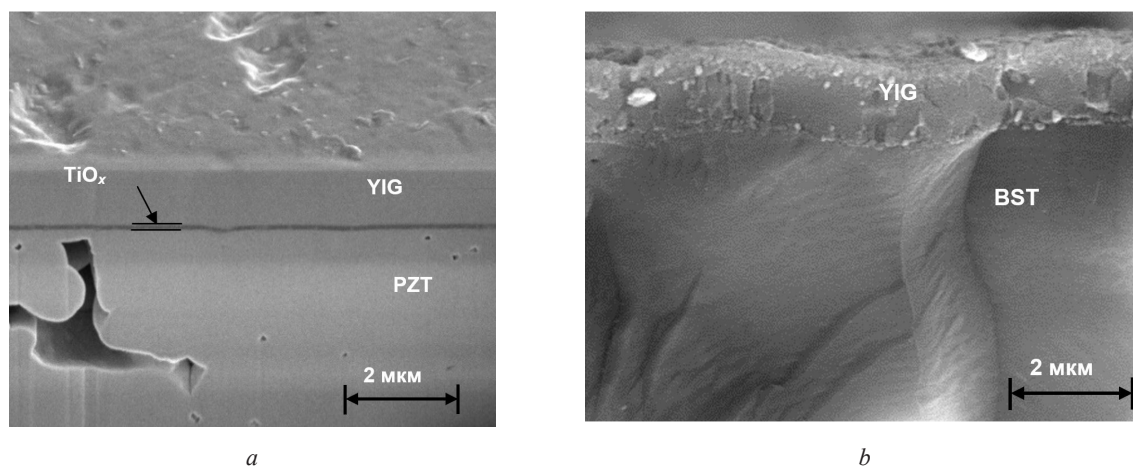


Рис. 1. Поперечное сечение гетероструктур YIG/ TiO_x /PZT (a) и YIG/BST (b)

Fig. 1. Cross section of YIG/ TiO_x /PZT (a) and YIG/BST (b) heterostructures

Видно, что гетероструктуры YIG/BST и YIG/TiO₂/PZT имеют непрерывный плоскопараллельный интерфейс без каких-либо дефектов, связанных со взаимодействием между слоем YIG и подложкой. Между слоем YIG и подложкой PZT хорошо заметна непрерывная темная полоса диоксида титана TiO₂ толщиной 0,2 мкм, который находится в аморфном состоянии, о чем свидетельствует отсутствие его рефлексов на рентгенограмме монокристаллической гетероструктуры YIG/TiO_x/PZT, приведенной на рис. 2, а. Диоксид титана входит в состав керамики PZT 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 YIG и подложкой. На рис. 2, б показана рентгенограмма монокристаллической гетероструктуры YIG/BST. Рентгенограмма слоя YIG для обоих случаев содержит узкие интенсивные отражения, которые можно индексировать по кубической симметрии. В этом случае параметр решетки для слоя субмикронной толщины составляет 1,2378 нм, что немного превышает параметр объемных монокристаллов YIG (1,2376 нм [9]).

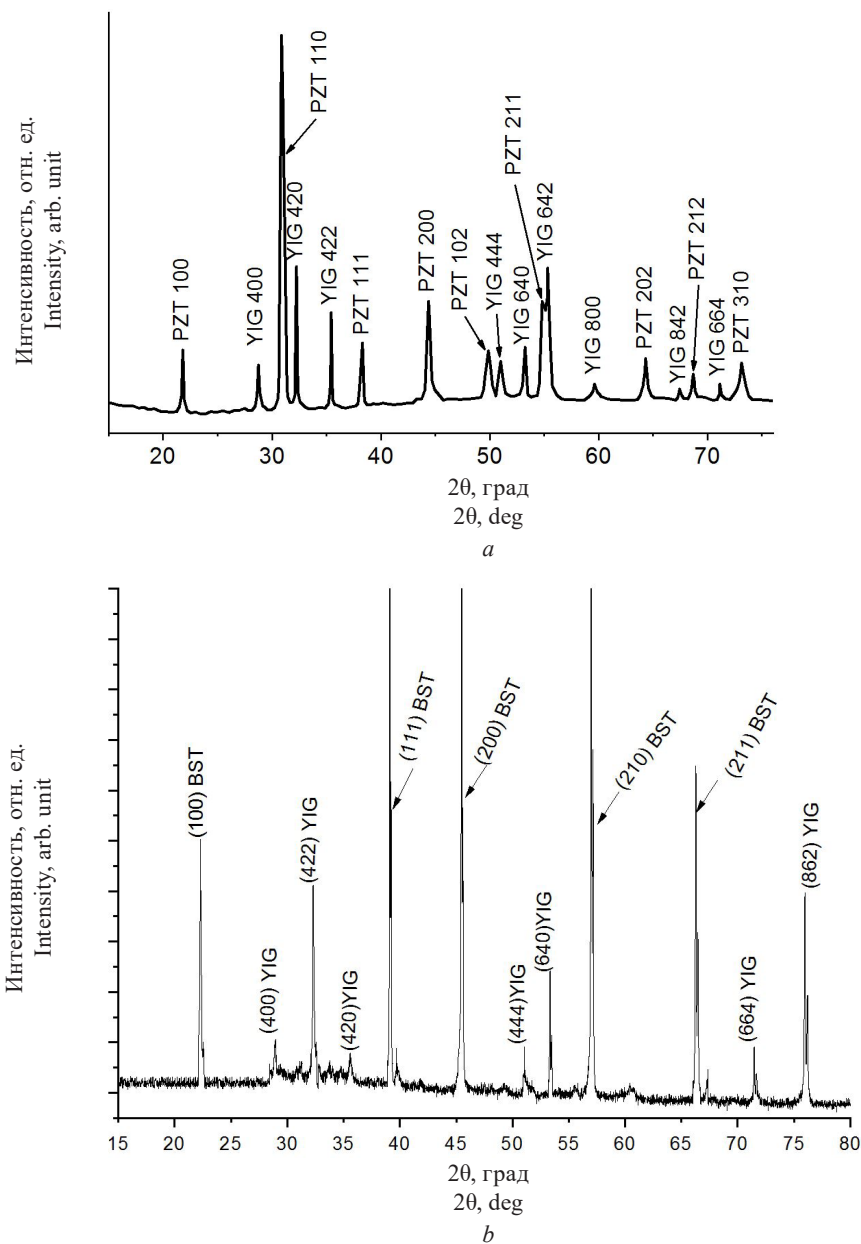


Рис. 2. Рентгенограммы структур YIG/TiO_x/PZT (а) и YIG/BST (б)

Fig. 2. X-ray diffraction pattern of YIG/TiO_x/PZT (a) and YIG/BST (b) structures

Несколько смещенные от первоначального положения пики подложки свидетельствуют, что в данном случае подложки, как PZT, так и BST, под слоем YIG толщиной 2 мкм находятся в напряженном состоянии. Следует обратить внимание на то, что при получении слоев феррит-гранатов методом ионно-лучевого распыления кристаллическая решетка всегда расширяется. Это можно объяснить как наличием некоторого количества собственных примесей в ней, так и тем, что рост феррит-граната происходит не по эпитаксиальному механизму сплошным слоем по всей площади, а на отдельных разупорядоченных зернах керамики за счет сильной адгезии растущей пленки к подложке. В этом случае не происходит упругой релаксации механических напряжений с ростом толщины слоя.

В таблице представлены значения дифракционных углов 2θ рефлексов от подложек PZT и BST, полученные из рентгенограммы (см. рис. 2), отвечающие им табличные значения, а также разница $\Delta\theta$ в углах между ними. В последней колонке приведено относительное искажение межплоскостных расстояний $\Delta a/a$, вычисленное по формуле

$$\Delta a/a = -\text{ctg}\theta\Delta\theta, \quad (1)$$

полученной дифференцированием условия Вульфа–Брэггов для максимумов рентгеновской дифракции с соблюдением правил приближенного вычисления.

Значения дифракционных углов 2θ рефлексов от подложки и слоя YIG и относительные искажения $\Delta a/a$ межплоскостных расстояний

Diffraction angles 2θ of reflections from the substrate and YIG layer and relative distortions $\Delta a/a$ of the lattice parameters

Подложка	Рефлекс	2θ , град		$\Delta a/a$	$\Delta a/a$, %
		На рентгенограмме, 2θ	Табличное значение, $2\theta_{\text{таб}}$		
PZT	100	21,95	22,1	0,007	0,675
	110	30,9	31,0	0,003	0,316
	111	38,27	38,4	0,004	0,352
	102	49,3	49,5	0,004	0,380
	202	64,8	64,6	-0,003	0,275
BST	100	22,1	22,3	0,009	0,894
	111	39,3	39,12	-0,004	0,440
	200	45,71	45,48	-0,005	0,476
	210	56,35	56,52	0,003	0,277
	211	66,45	66,28	-0,002	0,226

Как видно из таблицы, искажения параметров кристаллической решетки составляют $< 1\%$, что нельзя объяснить присутствием большого количества чужеродных примесей. Это подтверждает предположение о бездиффузионном механизме кристаллизации YIG [16] в наших условиях. Однако искажение параметров кристаллической решетки для структуры YIG/BST больше, чем для структуры YIG/TiO_x/PZT, что объясняется наличием аморфного буферного слоя TiO_x, который подавляет механические напряжения, возникающие на интерфейсе поликристаллическая подложка/поликристаллическая пленка.

Данные рентгеноструктурного анализа полностью коррелируют с результатами элементного анализа полученных структур методом характеристического рентгеновского излучения. Исходя из оценки спектров наложения отдельных элементов можно сделать вывод, что состав монолитных гетероструктур соответствует YIG/TiO_x/PZT и YIG/BST. Это свидетельствует об отсутствии посторонних химических соединений, наличие которых может привести к существенному ухудшению магнитных свойств.

Данные магнитных измерений и внешний вид петель намагничивания слоя YIG для гетероструктур YIG/TiO_x/PZT и YIG/BST (рис. 3) свидетельствуют о том, что слой YIG является сплошным и характеризуется намагниченностью насыщения 100 Гс для YIG/TiO_x/PZT и 120 Гс

для YIG/BST. Эффективная намагниченность насыщения слоя YIG составила более $0,7 M_{SAT}$ (где намагниченность насыщения монокристаллов YIG составляет $M_{SAT} = 139$ Гс) для YIG/TiO_x/PZT и более $0,85 M_{SAT}$ – для YIG/BST.

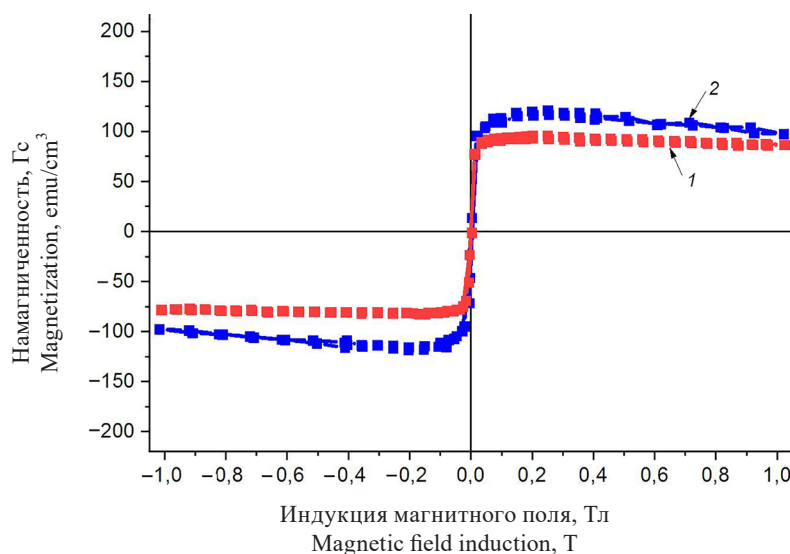


Рис. 3. Петли намагничивания слоя YIG для структуры YIG/TiO_x/PZT (1) и YIG/BST (2) при комнатной температуре. Поле направлено параллельно плоскости образца

Fig. 3. Magnetization loops of the YIG layer for the YIG/TiO_x/PZT (1) and YIG/BST (2) structures at room temperature. The field is directed parallel to the sample plane

Слои YIG на подложках PZT обладают большей магнитной неоднородностью по сравнению с аналогичными слоями на BST, которая возникает в результате взаимодействия буферного слоя TiO₂ с YIG. При наличии барьерного слоя одновременно идет кристаллизация слоя YIG на подложке PZT при отжиге от поверхности и подложки. Так как внутренняя энергия слой/поверхность меньше, чем подложка/слой, то у поверхности образуются большие кристаллиты, а у подложки формируется менее структурно совершенный слой. В результате этого кристаллиты прорастают в буферный слой, что приводит к увеличению дефектности и, следовательно, магнитной неоднородности. Улучшение магнитных свойств на подложках BST связано с двустадийным формированием слоя YIG. После первой стадии осаждения-распыления YIG в качестве подложки выступает уже не чистый BST, а BST с переходным слоем кристаллизованного слоя YIG, который в данном случае выступает как подложка для вновь напыляемого слоя и является для него близким по структурным и физическим свойствам. Таким образом происходит понижение свободной энергии на границе подложка/слой, в результате чего фронт кристаллизации идет не от поверхности, а от интерфейсной области, что влечет за собой уменьшение дефектности, которую привносит подложка в осаждаемый на нее материал. Это приводит к большей магнитной однородности YIG/BST по сравнению с аналогичными слоями на PZT.

Узкая ширина линии ферромагнитного резонанса (ФМР) ΔH (рис. 4, *a*) также позволяет судить о магнитной однородности образца по площади, что в свою очередь свидетельствует и о структурной однородности. На рис. 4, *a* приведена типичная зависимость амплитуды ФМР от внешнего магнитного поля на частоте 9,45 ГГц для слоя YIG толщиной 2 мкм с буферным слоем TiO₂ на керамической подложке PZT. Частота магнитного резонанса слоя YIG (9,45 ГГц) совпадает с результатами амплитудно-частотной характеристики для образца YIG/BST (рис. 4, *b*), что позволяет судить об идентичности магнитных свойств полученных структур.

По ширине резонанса ΔH на частоте ФМР можно оценить безразмерный параметр демпфирования Гильберта α . Согласно [15], он удовлетворяет следующему соотношению: $\Delta H \approx 2\pi f \alpha / \gamma$, где f – частота ФМР, а $\gamma = 1,7588 \cdot 10^7 \text{ Э}^{-1}$ – гиромангнитное отношение. В общем случае на параметр α может влиять ряд факторов, в том числе неоднородности слоя, параметры подложки и наличие

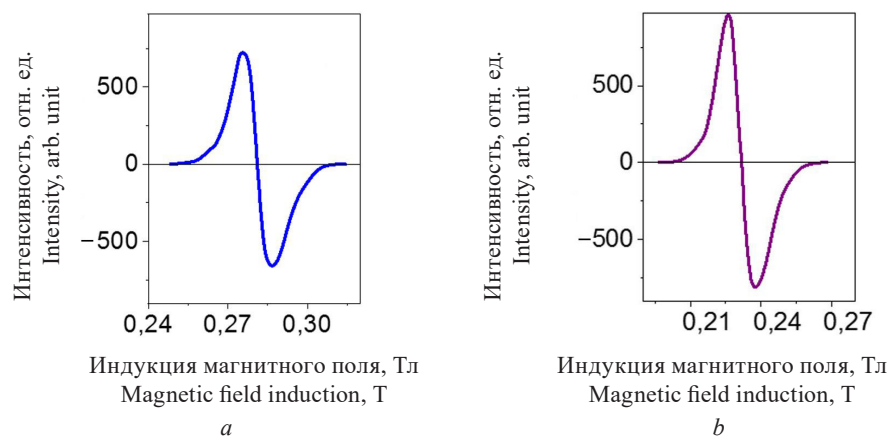


Рис. 4. Зависимость интенсивности резонанса от магнитного поля резонанса на частоте 9,45 ГГц для YIG/TiO_x/PZT (a) и YIG/BST (b); $\Theta = 90^\circ$

Fig. 4. Dependence of the resonance intensity on the magnetic field of the resonance at a frequency of 9.45 GHz for YIG/TiO_x/PZT (a) and YIG/BST (b); $\Theta = 90^\circ$

поликристаллической структуры. Для рассматриваемых образцов во внешнем магнитном поле, приложенном вдоль их поверхности, ширина линии ФМР ΔH лежит в диапазоне 50–100 Э и резонансное поле составляет $H_r = 470$ мТ. Это значение соответствует $\alpha = 1,48 \cdot 10^{-3}$. Такая ширина линии ФМР достаточна для приборов с характерными размерами 100 мкм, что соответствует современным полевым транзисторам с магнитоуправляемым затвором.

Заключение. В работе были получены структуры YIG толщиной 2 мкм на сегнетоэлектрических керамических подложках PbZr_{0,45}Ti_{0,55}O₃ и Ba_{0,4}Sr_{0,6}TiO₃. Показано, что ионно-лучевое распыление-осаждение в сочетании с предварительной подготовкой поверхности подложек и создание переходных барьерных слоев позволяют в дальнейшем получить монолитную структуру YIG на керамике PZT и BST.

Представленные результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что слой YIG на подложках находится в напряженном состоянии. Сканирующая электронная микроскопия в сочетании с методом сфокусированного ионного пучка свидетельствует о формировании высококачественного плоскопараллельного интерфейса YIG/подложка.

Полученные структуры имеют стабильный химический состав, четкий плоскопараллельный интерфейс со сплошным слоем YIG и обладают высокими значениями магнитных характеристик, что делает их привлекательными для использования в логических схемах на основе спиновых волн с малым рассеиванием, элементах памяти, а также электрически управляемых устройствах СВЧ-диапазона.

Список использованных источников

1. Ishak, W. S. Magnetostatic wave technology: a review / W. S. Ishak // Proc. IEEE. – 1988. – Vol. 76, № 2. – P. 171–187. <https://doi.org/10.1109/5.4393>
2. Стрейнтроника – новое направление микро- и нанoeлектроники и науки о материалах / А. А. Бухараев [и др.] // Успехи физ. наук. – 2018. – Т. 188, № 12. – С. 1288–1330. <https://doi.org/10.3367/UFNr.2018.01.038279>
3. Gurevich, A. G. Magnetization Oscillations and Waves / A. G. Gurevich, G. A. Melkov. – London: CRC, 1996. – 464 p. <https://doi.org/10.1201/9780138748487>
4. Вашковский, А. В. Магнитостатистические волны в электронике сверхвысоких частот: учеб. пособие для физ. спец. ун-тов / А. В. Вашковский, В. С. Стальмахов, Ю. Г. Шараевский; Саратов. гос. ун-т им. Н. Г. Чернышевского. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1993. – 314 с.
5. Magnon Straintronics: Reconfigurable Spin-Wave Routing in Strain-Controlled Bilateral Magnetic Stripes / A. V. Sadovnikov [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2018. – Vol. 120. – Art. ID 257203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.257203>
6. Interface magnetoelectric effect in elastically linked Co/PZT/Co layered structures / A. I. Stognij [et al.] // J. Magn. Magn. Mater. – 2019. – Vol. 485. – P. 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.006>

7. Preparation and investigation of the magnetoelectric properties in layered cermet structures / A. I. Stognij [et al.] // *Ceram. Int.* – 2019. – Vol. 45, iss. 10. – P. 13030–13036. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.03.234>
8. Выращивание пленок $Y_3Fe_5O_{12}$ на Si с буферными слоями AlO_x и SiO_2 методом ионно-лучевого распыления / А. И. Стогний [и др.] // *Неорган. материалы.* – 2017. – Т. 53, № 10. – С. 1093–1098.
9. Magnetic properties, spin waves and interaction between spin excitations and 2D electrons in interface layer in $Y_3Fe_5O_{12}/AlO_x/GaAs$ -heterostructures / L. V. Lutsev [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2017. – Vol. 51, № 35. – Art. ID 355002 (8 p). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad41b>
10. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films sputtered on GaN-based substrates / A. I. Stognij [et al.] // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2015. – Vol. 48, № 48. – Art. ID 485002 (8 p). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485002>
11. Stognij, A. I. Ion-beam engineering of Co/TiO₂ multilayer nanostructures / A. I. Stognij, M. V. Pashkevich, N. N. Novitskii // *Tech. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 36. – P. 426–429. <https://doi.org/10.1134/S1063785010050111>
12. Magnetoelectric effects in porous ferromagnetic-piezoelectric bulk composites: Experiment and theory / V. M. Petrov [et al.] // *Phys. Rev. B: Condens. Matter.* – 2007. – Vol. 75. – Art. ID 174422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.174422>
13. Влияние состояния границ раздела на величину магнитоэлектрического эффекта в пленках Co(Ni) на подложках $PbZr_{0.45}Ti_{0.55}O_3$ и GaAs / А. И. Стогний [и др.] // *Неорганические материалы.* – 2016. – Т. 52, № 10. – С. 1141–1147.
14. Stognij, A. I. The synthesis of metal oxide films from compound powder targets / A. I. Stognij, V. V. Tokarev, Yu. N. Mitin // *Mater. Res. Soc. Proc.* – 1991. – Vol. 236. – P. 331–334. <https://doi.org/10.1557/PROC-236-331>
15. Spin precession modulation in a magnetic bilayer / A. Stupakiewicz [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2012. – Vol. 101. – Art. ID 262406. <https://doi.org/10.1063/1.4773508>
16. Enhanced Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films Deposited on Silicon Substrates by Ion-Beam Evaporation / V. K. Sakharov [et al.] // *IEEE Magn. Lett.* – 2017. – Vol. 8. – Art. ID 3704105 (5 p). <https://doi.org/10.1109/LMAG.2017.2659638>

References

1. Ishak W. S. Magnetostatic wave technology: a review. *Proceedings of the IEEE*, 1988, vol. 76, no. 2, pp. 171–187. <https://doi.org/10.1109/5.4393>
2. Bukharaev A. A., Zvezdin A. K., Pyatakov A. P., Fetisov Y. K. Straintronics: a new trend in micro- and nanoelectronics and materials science. *Physics Uspekhi*, 2018, vol. 61, no. 12, pp. 1175–1212. <https://doi.org/10.3367/UFNe.2018.01.038279>
3. Gurevich A. G., Melkov G. A. *Magnetization Oscillations and Waves*. London, CRC, 1996. 464 p. <https://doi.org/10.1201/9780138748487>
4. Vashkovskii A. V., Stal'makhov V. S., Sharaevskii Yu. P. *Magnetostatic Waves in Microwave Electronics*. Saratov, Saratov State University Publ., 1993. 314 p. (in Russian).
5. Sadovnikov A. V., Grachev A. A., Sheshukova S. E., Sharaevskii Yu. P., Serdobintsev A. A., Mitin D. M., Nikitov S. A. Magnon Straintronics: Reconfigurable Spin-Wave Routing in Strain-Controlled Bilateral Magnetic Stripes. *Physical Review Letters*, 2018, vol. 120, art. ID 257203. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.257203>
6. Stognij A. I., Novitskii N. N., Trukhanov S. V., Trukhanov A. V., Panina L. V., Sharko S. A., Serokurova A. I. [et al.]. Interface magnetoelectric effect in elastically linked Co/PZT/Co layered structures. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2019, vol. 485, pp. 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2019.04.006>
7. Stognij A. I., Sharko S. A., Serokurova A. I., Trukhanov S. V., Trukhanov A. V., Panina L. V., Ketsko V. A. [et al.]. 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>
8. Stognij A. I., Novitskii N. N., Golikova O. L., Bepalov A. V., Gieniusz R., Maziewski A., Stupakiewicz A. [et al.]. Growth of $Y_3Fe_5O_{12}$ films on Si with AlO_x and SiO_2 buffer layers by ion beam sputtering. *Inorganic Materials*, 2017, vol. 53, no. 10, pp. 1069–1074. <https://doi.org/10.1134/S0020168517100156>
9. Lutsev L. V., Stognij A. I., Novitskii N. N., Gieniusz R. Magnetic properties, spin waves and interaction between spin excitations and 2D electrons in interface layer in $Y_3Fe_5O_{12}/AlO_x/GaAs$ -heterostructures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, vol. 51, no. 35, art. ID 355002 (8 p). <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aad41b>
10. Stognij A., Lutsev L., Novitskii N., Bepalov A., Golikova O., Ketsko V., Gieniusz R., Maziewski A. Synthesis, magnetic properties and spin-wave propagation in thin $Y_3Fe_5O_{12}$ films sputtered on GaN-based substrates. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2015, vol. 48, no. 48, art. ID 485002 (8 p). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/48/48/485002>
11. Stognij A. I., Pashkevich M. V., Novitskii N. N. Ion-beam engineering of Co/TiO₂ multilayer nanostructures. *Technical Physics Letters*, 2010, vol. 36, pp. 426–429. <https://doi.org/10.1134/S1063785010050111>
12. 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, art. ID 174422. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.75.174422>

13. Stognij A. I., Novitskii N. N., Ketsko V. A., Sharko S. A., Poddubnaya N. N., Laletin V. M., Bespalov A. V. [et al.]. Influence of the State of Interfaces on the Magnitude of the Magnetoelectric Effect in Co(Ni) Films on $\text{PbZr}_{0.45}\text{Ti}_{0.55}\text{O}_3$ and GaAs Substrates. *Inorganic Materials*, 2016, vol. 52, no. 10, pp. 1070–1076. <https://doi.org/10.1134/S0020168516100162>
14. Stognij A. I., Tokarev V. V., Mitin Yu. N. The synthesis of metal oxide films from compound powder targets. *Materials Research Society Proceedings*, 1991, vol. 236, pp. 331–334. <https://doi.org/10.1557/PROC-236-331>
15. Stupakiewicz A., Pashkevich M., Maziewski A., Stognij A., Novitskii N. Spin precession modulation in a magnetic bilayer. *Applied Physics Letters*, 2012, vol. 101, art. ID 262406. <https://doi.org/10.1063/1.4773508>
16. Sakharov V. K., Khivintsev Yu. V., Vysotskii S. L., Stognij A. I., Filimonov Y. A. Enhanced Nonreciprocity of Magnetostatic Surface Waves in Yttrium-Iron-Garnet Films Deposited on Silicon Substrates by Ion-Beam Evaporation. *IEEE Magnetism Letters*, 2017, vol. 8, art. ID 3704105 (5 p.). <https://doi.org/10.1109/LMAG.2017.2659638>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-17-27>
УДК 537.87



Оригинальная статья

**О. В. Бойправ^{*}, Е. С. Белоусова, Н. В. Богуш, С. Э. Саванович, М. М. Касперович,
А. В. Гусинский, И. А. Захаров**

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь*

УГЛЕСОДЕРЖАЩИЕ ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА С РЕЛЬЕФНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Аннотация. Представлена новая технология изготовления поглотителей электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона, характеризующихся геометрически неоднородной поверхностью. Новизна представленной технологии заключается в использовании радиопрозрачных полимерных форм с полусферическими углублениями одинакового объема, которые являются компонентом для формирования поверхностного слоя поглотителей. Технология состоит в заполнении указанных форм находящейся в жидкой фазе смесью порошкообразного активированного древесного (березового) угля и связующего вещества и дальнейшем ее высушивании в формах. По сравнению с аналогами разработанная технология характеризуется невысокой сложностью воспроизведения. Большая часть временных затрат, необходимых для реализации представленной технологии, связана с процессом высыхания смеси порошкообразного активированного березового угля и связующего вещества. Приведены установленные экспериментальным путем закономерности изменения значений коэффициентов отражения и поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц поглотителей, изготовленных в соответствии с представленной технологией, в зависимости от типа содержащегося в них связующего вещества (водный раствор поливинилацетата, водный раствор гипса, полиуретановая мастика). Определено, что наиболее эффективными из исследованных в ходе установления обозначенных закономерностей поглотителей ЭМИ являются те, которые содержат водный раствор поливинилацетата. Значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц таких поглотителей изменяются в пределах от 0,75 до 0,99. Кроме того, масса на единицу площади таких поглотителей ниже в 1,5–2,0 раза массы на единицу площади поглотителей, содержащих водный раствор гипса или полиуретановую мастику. Изготовленные по представленной технологии поглотители ЭМИ СВЧ-диапазона характеризуются более высокой механической прочностью, а также более низкой стоимостью в сравнении с аналогами и рекомендованы для использования при создании безэховых камер.

Ключевые слова: коэффициент отражения, коэффициент поглощения, порошкообразный активированный древесный уголь, электромагнитное излучение

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Бойправ Ольга Владимировна*^{*} – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0002-9987-8109>. E-mail: smu@bsuir.by; *Белоусова Елена Сергеевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0001-9834-6074>. E-mail: belousova@bsuir.by; *Богуш Наталья Валерьевна* – научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Материалы, технологии и средства обеспечения безопасности» научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0002-7832-8597>. E-mail: nbogush@bsuir.by; *Саванович Светлана Эдуардовна* – ассистент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0001-7977-8031>. E-mail: svetasav@bsuir.by; *Касперович Марина Михайловна* – научный сотрудник научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: kaspriarovich@bsuir.by; *Гусинский Александр Владимирович* – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой информационно-измерительных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: a.gusinskij@bsuir.by; *Захаров Иван Андреевич* – младший научный сотрудник научно-производственно-образовательного инновационного центра СВЧ-технологий и их метрологического обеспечения научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com

Вклад авторов: *Бойправ Ольга Владимировна* – разработка технологии, определение целей и задач исследования, изготовление экспериментальных образцов поглотителей электромагнитного излучения на основе водного раствора гипса и водного раствора поливинилацетата, расчет значений коэффициента поглощения электромагнитного

^{*} Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

излучения экспериментальных образцов, интерпретация результатов исследования, написание текста рукописи; *Белоусова Елена Сергеевна* – разработка технологии, изготовление экспериментальных образцов поглотителей электромагнитного излучения на основе водного раствора поливинилацетата; *Богущ Наталья Валерьевна* – разработка технологии, изготовление экспериментальных образцов поглотителей электромагнитного излучения на основе водного раствора гипса; *Саванович Светлана Эдуардовна* – изготовление экспериментальных образцов поглотителей электромагнитного излучения на основе полиуретановой мастики; *Касперович Марина Михайловна* – измерение значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов; *Гусинский Александр Владимирович* – анализ результатов измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов; *Захаров Иван Андреевич* – измерение значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов.

Для цитирования: Углеродсодержащие поглотители электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с рельефной поверхностью / О. В. Бойправ [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 17–27. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-17-27>

Поступила в редакцию: 04.10.2023

Доработанный вариант: 23.01.2024

Утверждена к публикации: 22.02.2024

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

**Olga V. Boiprav*, Elena S. Belousova, Natalia V. Bogush, Sviatlana E. Savanovich,
Marina M. Kasperovich, Alexander V. Gusinsky, Ivan A. Zakharov**

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus*

CHARCOAL-CONTAINING MICROWAVE ELECTROMAGNETIC RADIATION ABSORBERS WITH RELIEF SURFACE

Abstract. A new technology for manufacturing microwave electromagnetic radiation (EMR) absorbers characterized by a geometrically inhomogeneous surface is presented. The novelty of the presented technology lies in the use of radiotransparent polymer forms with hemispherical depressions of the same volume, which are the component for the formation of the surface layer of absorbers. The technology consists in filling these molds with a mixture of powdered activated (birch) charcoal and the binder in the liquid phase and further drying it in the forms. Compared with analogues, the developed technology is characterized by low complexity of reproduction. Most of the time required to implement the presented technology is associated with the drying process of a mixture of powdered activated birch charcoal and a binder. The experimentally established patterns of changes in the values of electromagnetic radiation reflection and absorption coefficients in the frequency range 1.0–28.0 GHz of the absorbers manufactured in accordance with the presented technology are provided, depending on the type of binder contained in them (polyvinyl acetate aqueous solution, gypsum aqueous solution, polyurethane mastic). It was determined that the most effective of the EMR absorbers studied in the course of establishing the indicated patterns are those ones that contain an aqueous solution of polyvinyl acetate. Electromagnetic radiation absorption coefficient values in the frequency range 1.0–28.0 GHz of such absorbers vary from 0.75 to 0.99. In addition, the mass per unit area of such absorbers is 1.5–2.0 times less than the mass per unit area of absorbers containing an gypsum aqueous solution or polyurethane mastic. Microwave EMR absorbers manufactured using the presented technology are characterized by higher mechanical strength, as well as lower cost compared to analogues and are recommended for use in the creation of anechoic chambers.

Keywords: reflection coefficient, absorption coefficient, powdered activated charcoal, electromagnetic radiation

Information about the authors: *Olga V. Boiprav** – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0002-9987-8109>. E-mail: smu@bsuir.by; *Elena S. Belousova* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0001-9834-6074>. E-mail: belousova@bsuir.by; *Natalia V. Bogush* – Researcher of the Scientific Research Laboratory “Materials, Technologies and Means of Security Ensuring” of R&D Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0002-7832-8597>. E-mail: nbogush@bsuir.by; *Svetlana E. Savanovich* – Assistant of the Information Protection Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0001-7977-8031>. E-mail: svetasav@bsuir.by; *Marina M. Kasperovich* – Researcher of the Scientific-Production-Educational Innovation Center for Microwave Technologies and Their Metrological Support of R&D Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: kaspiarovich@bsuir.by; *Alexander V. Gusinsky* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Information and Measuring Systems Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: a.gusinskij@bsuir.by; *Ivan A. Zakharov* – Junior Researcher of the Scientific-Production-Educational Innovation Center for Microwave Technologies and Their Metrological Support of R&D Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: iv.andr.zakharov@gmail.com

Contribution of the authors: *Olga V. Boiprav* – technology development, determination of the study aim and objectives, production of experimental samples of electromagnetic radiation absorbers based on gypsum aqueous solution and polyvinyl acetate aqueous solution, calculation of electromagnetic radiation absorption coefficient values of the experimental samples,

research results interpretation, writing the text of the manuscript; *Elena S. Belousova* – technology development, production of experimental samples of electromagnetic radiation absorbers based on polyvinyl acetate aqueous solution; *Natalia V. Bogush* – technology development, production of experimental samples of electromagnetic radiation absorbers based on gypsum aqueous solution; *Svetlana E. Savanovich* – production of experimental samples of electromagnetic radiation absorbers based on polyurethane mastic; *Marina M. Kasperovich* – measurement of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples; *Alexander V. Gusinsky* – analysis of the results of measuring the electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples; *Ivan A. Zakharov* – measurement of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples.

For citation: Boiprav O. V., Belousova E. S., Bogush N. V., Savanovich S. E., Kasperovich M. M., Gusinsky A. V., Zakharov I. A. Charcoal-containing microwave electromagnetic radiation absorbers with relief surface. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 17–27 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-17-27>

Received: 04.10.2023

Modified version: 23.01.2024

Approved for publication: 22.02.2024

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. Поглотители электромагнитного излучения (ЭМИ) СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью в настоящее время используются как для создания безэховых камер и экранированных помещений, так и для зонального экранирования пространства в местах расположения приборов электронной техники [1–3]. Такие поглотители характеризуются более широким по сравнению с поглотителями с плоской поверхностью рабочим диапазоном частот [4].

Геометрические неоднородности поверхности современных поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона, как правило, представляют собой совокупность пирамид [5]. Такие поглотители изготавливаются с применением одной из следующих операций (совокупности операций):

высушивание в пресс-формах с пирамидальными углублениями композиционной смеси на основе радиопрозрачного связующего вещества и электропроводящего порошкообразного или волокнистого наполнителя и дальнейшего извлечения из этих форм полученных поглотителей ЭМИ [4, 6, 7];

нанесение на пирамидальные выступы поверхности основы, изготовленной из твердотельного радиопрозрачного материала, композиционной смеси на основе радиопрозрачного связующего вещества и электропроводящего порошкообразного или волокнистого наполнителя [8];

заполнение пор изготовленной из пенополиуретана основы, поверхность которой имеет выступы в виде пирамид, частицами диэлектрического и/или электропроводящего материала [9].

Одним из основных недостатков поглотителей ЭМИ, характеризующихся геометрически неоднородной поверхностью в виде совокупности пирамид, является низкая механическая прочность вершин последних, что накладывает ограничения на процессы транспортировки, монтажа и эксплуатации таких поглотителей.

Цель исследования – экспериментальное обоснование новой технологии изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью, для которых не характерен обозначенный недостаток.

Для достижения этой цели были поставлены и решены следующие задачи:

1) выбраны и обоснованы основные и вспомогательные материалы, а также оснастка для изготовления поглотителей ЭМИ;

2) с применением выбранных материалов и оснастки изготовлены экспериментальные образцы поглотителей ЭМИ различных типов;

3) осуществлены количественная оценка и сравнительный анализ значений коэффициентов отражения, передачи и поглощения ЭМИ изготовленных экспериментальных образцов поглотителей ЭМИ;

4) проведен сравнительный анализ рабочего диапазона частот, а также эксплуатационных характеристик исследованных поглотителей ЭМИ и их аналогов.

Методика изготовления и исследования материалов. В ходе решения первой из задач, поставленных для достижения цели исследования, учитывались следующие особенности, связанные с разработкой поглотителей электромагнитного излучения СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью:

1) в настоящее время является актуальной задачей снижение стоимости поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью за счет использования для их изготовления недорогостоящих компонентов [1, 4];

2) высота геометрических неоднородностей поверхности поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона не должна превышать 50,0 % от значения длины электромагнитной волны на верхней граничной частоте рабочего диапазона частот этих поглотителей [4];

3) ширина основания геометрических неоднородностей поверхности поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона не должна превышать значение длины электромагнитной волны на нижней граничной частоте рабочего диапазона частот этих поглотителей [4].

С учетом первой из обозначенных особенностей в качестве основного материала для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью был выбран порошкообразный активированный древесный (березовый) уголь. По сравнению с другими электропроводящими материалами, используемыми в настоящее время для изготовления исследуемого типа поглотителей, порошкообразный древесный (березовый) уголь характеризуется наиболее низкой стоимостью [10]. Также при выборе основного материала для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью учитывались представленные в [10] результаты исследований характеристик отражения и передачи ЭМИ в СВЧ-диапазоне композиционных материалов на основе порошкообразных углей различных типов.

В качестве вспомогательных материалов для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью были выбраны строительные связующие вещества. Такой выбор обусловлен их высокой доступностью и невысокой стоимостью по сравнению с нестроительными связующими веществами [11].

В качестве оснастки для изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью использовались выполненные из радиопрозрачного полимерного материала твердотельные формы с полусферическими углублениями. Причиной такого выбора послужило отсутствие в них остроугольных вершин. Данная особенность обуславливает более низкие временные и финансовые затраты на изготовление таких форм. Кроме того, вершины поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона, произведенные с использованием таких форм, характеризуются более высокой механической прочностью, чем изготовленные с применением форм с пирамидальными углублениями. Высота и ширина оснований углублений выбранных форм удовлетворяла второй и третьей из обозначенных особенностей.

В ходе решения второй из задач исследования с использованием выбранных основных и вспомогательных материалов, а также оснастки были изготовлены три типа экспериментальных образцов поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона. В табл. 1 представлены характеристики изготовленных экспериментальных образцов.

Таблица 1. Характеристики изготовленных экспериментальных образцов

Table 1. Characteristics of the manufactured experimental samples

Условное обозначение	Вспомогательный материал, использованный для изготовления	Масса на единицу площади, кг/м ²
Образцы типа 1	30%-ный водный раствор гипса	7,5
Образцы типа 2	50%-ный водный раствор поливинилацетата	5,0
Образцы типа 3	Полиуретановая мастика	9,5

Порядок изготовления указанных экспериментальных образцов поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона был следующим.

1. Изготовление смеси на основе порошкообразного активированного древесного (березового) угля с размером частиц более 3,0 мм и вспомогательного материала (объемная пропорция указанных компонентов – 1 : 3).

2. Заполнение изготовленной смесью твердотельной формы с полусферическими углублениями.

3. Высушивание находящейся в данной форме смеси в вентиляционном сушильном шкафу при температуре 30,0–35,0 °С.

4. Откраивание от рулона фольгированного полимерного материала фрагмента, длина и ширина которого равны длине и ширине используемой формы.

5. Клеевое соединение откраенного фрагмента фольгированного полимерного материала и твердотельной формы с полусферическими углублениями, заполненной высушенной смесью на основе порошкообразного активированного древесного (березового) угля и вспомогательного материала.

Представленный порядок по своей сути является основой для предлагаемой авторами новой технологии изготовления поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона с геометрически неоднородной поверхностью. Как из него видно, большая часть временных затрат, необходимых для реализации предлагаемой технологии, связана с процессом высыхания смеси порошкообразного активированного березового угля и связующего вещества.

На рис. 1, *a* представлен внешний вид сверху одного из изготовленных экспериментальных образцов, а на рис. 1, *b* – внешний вид сбоку фрагмента одного из таких образцов. Высота геометрических неоднородностей поверхностей изготовленных экспериментальных образцов составляла 8,0 мм.

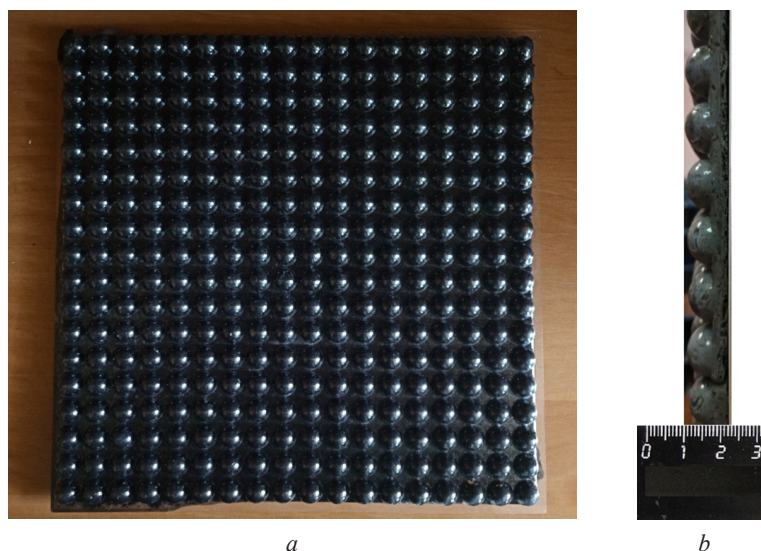


Рис. 1. Внешний вид сверху одного из изготовленных экспериментальных образцов (*a*) и внешний вид сбоку фрагмента одного из полученных образцов (*b*)

Fig. 1. Top view of one of the manufactured experimental samples (*a*) and side view of one of the obtained experimental samples fragment (*b*)

В ходе решения третьей из задач исследования проводились измерения значений коэффициентов отражения (S_{11} , дБ) и передачи (S_{21} , дБ) ЭМИ в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц изготовленных экспериментальных образцов. При этом использовалась установка, которая включала в себя векторный анализатор цепей MS4 644B, антенны П6-23 и П6-65. Измерения проводились в ближней зоне распространения электромагнитных волн путем перекрытия раскрыва антенны материалом исследуемого образца, что соответствует прямому углу падения указанных волн.

Значения коэффициента поглощения ЭМИ экспериментальных образцов устанавливались расчетным путем на основе результатов проведенных измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ. Порядок проведения расчетов был следующим [12].

1. Преобразование значений коэффициента отражения ЭМИ, представленных в децибелах, в значения, представленные в относительных единицах (долях), в соответствии со следующей формулой:

$$R = 10^{\frac{S_{11}}{10}}, \text{ отн. ед.}, \quad (1)$$

где R – значение коэффициента отражения ЭМИ.

2. Преобразование значений коэффициента передачи ЭМИ, представленных в децибелах, в значения, представленные в относительных единицах (долях), в соответствии со следующим выражением:

$$T = 10^{\frac{S_{21}}{10}}, \text{ отн. ед.}, \quad (2)$$

где T – значение коэффициента передачи ЭМИ, представленное в относительных единицах.

3. Расчет значений коэффициента поглощения ЭМИ (A , отн. ед.) в соответствии со следующей формулой:

$$A = 1 - R - T, \text{ отн. ед.} \quad (3)$$

Результаты и их обсуждение. В ходе сравнительного анализа рабочего диапазона частот и эксплуатационных характеристик поглотителей ЭМИ (четвертая задача исследования) использовались полученные по результатам проведения измерений и расчетов частотные зависимости коэффициентов отражения и поглощения ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц исследованных образцов поглотителей ЭМИ. Частотные зависимости коэффициента отражения представлены на рис. 2.

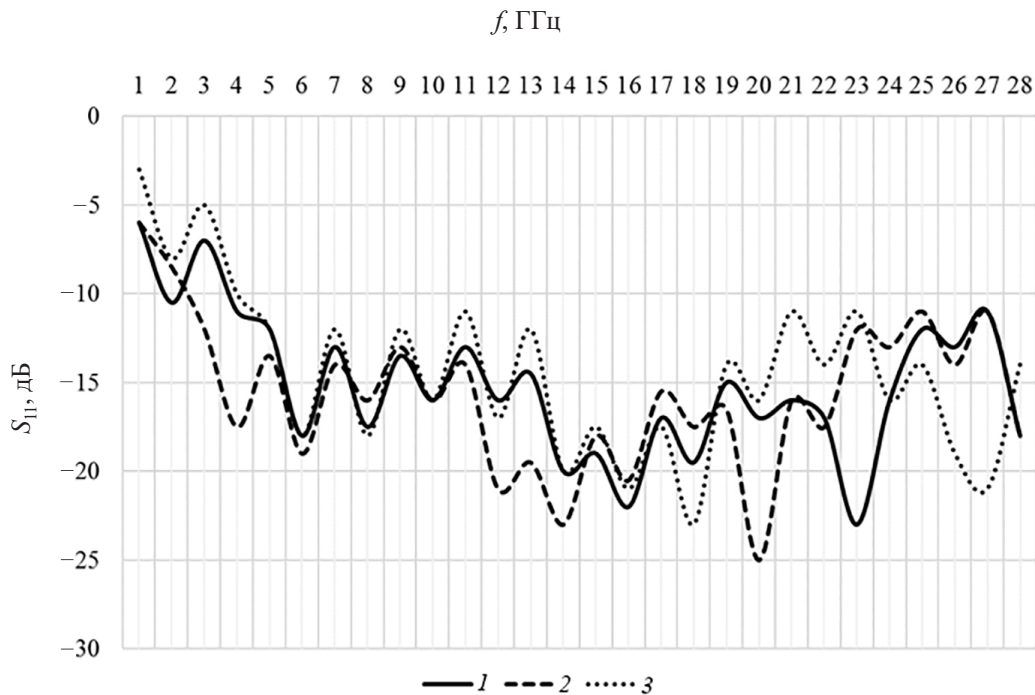


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 1,0–28,0 ГГц экспериментальных образцов типов 1, 2 и 3 (кривые 1, 2 и 3 соответственно)

Fig. 2. Frequency dependencies of electromagnetic radiation reflection coefficient in the range 1.0–28.0 GHz of the experimental samples of absorbers 1, 2 and 3 (curves 1, 2 and 3, respectively)

Видно, что значения коэффициента отражения ЭМИ в указанном диапазоне частот экспериментальных образцов, изготовленных на основе водного раствора гипса, изменяются в пределах от $-6,0$ до $-23,0$ дБ, а изготовленных на основе водного раствора поливинилацетата и полиуретановой мастики – в пределах от $-6,0$ до $-25,0$ дБ и от $-3,0$ до $-23,0$ дБ соответственно. Установлено, что среднее значение коэффициента отражения ЭМИ первых из указанных экспериментальных образцов составляет $-15,1$ дБ, а вторых и третьих – соответственно $-15,7$ дБ и $-14,9$ дБ.

Более высокое среднее значение коэффициента отражения ЭМИ экспериментальных образцов, изготовленных на основе полиуретановой мастики, по сравнению со значениями коэффициента отражения ЭМИ экспериментальных образцов, изготовленных на основе водного раствора

поливинилацетата и водного раствора гипса, может быть обусловлено тем, что разность между волновым сопротивлением первого из указанных образцов и воздуха превышает разность между волновым сопротивлением второго и третьего из указанных образцов и воздуха, так как диэлектрическая проницаемость полиуретана выше, чем гипса и поливинилацетата [13–16]. Осциллирующий характер частотных зависимостей коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц экспериментальных образцов обусловлен соответствующим свойством электромагнитных волн.

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц исследуемых образцов всех типов составляют $\sim 40,0$ дБ. Изготовленные экспериментальные образцы характеризуются примерно одинаковыми значениями коэффициента передачи ЭМИ в указанном диапазоне частот, так как фольгированный полимерный материал, входящий в структуру этих образцов, оказывает большее влияние на уровень ослабляемой ими энергии ЭМИ, взаимодействующего с ними, чем содержащееся в них связующее вещество.

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц исследованных образцов поглотителей ЭМИ, значения которого были рассчитаны в соответствии с формулами (1)–(3), представлены на рис. 3.

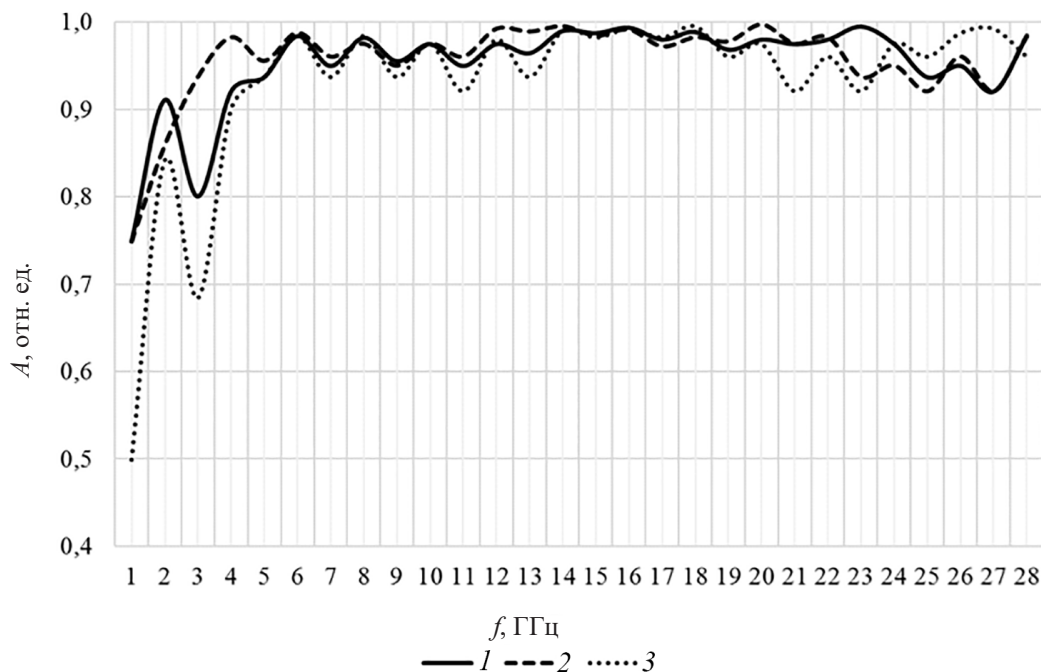


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 1,0–28,0 ГГц экспериментальных образцов поглотителей 1, 2 и 3 (кривые 1, 2 и 3 соответственно)

Fig. 3. Frequency dependencies of electromagnetic radiation absorption coefficient in the range 1.0–28.0 GHz of the experimental samples of types 1, 2 and 3 (curves 1, 2 and 3, respectively)

Видно, что значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц экспериментальных образцов, изготовленных на основе водного раствора гипса и водного раствора поливинилацетата, изменяются в пределах от 0,75 до 0,99, а образцов, изготовленных на основе полиуретановой мастики, – в пределах от 0,50 до 0,99. Установлено, что среднее значение коэффициента поглощения ЭМИ первых и вторых из указанных экспериментальных образцов составляет соответственно 0,95 и 0,96, а третьего – 0,93. Более низкое среднее значение коэффициента поглощения ЭМИ экспериментальных образцов на основе полиуретановой мастики по сравнению с экспериментальными образцами на основе водного раствора гипса и водного раствора поливинилацетата обусловлено более высоким средним значением коэффициента отражения ЭМИ.

Значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типов 1, 2 и 3 в зависимости от значения частоты ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц могут быть аппроксимированы соответственно с использованием следующих функций:

$$A_1(f) = 1,0 - \frac{0,25}{f}, \quad A_2(f) = 1,0 - \frac{0,2}{f}, \quad A_3(f) = 1,0 - \frac{0,5}{f},$$

где $A_1(f)$, $A_2(f)$ и $A_3(f)$ – функции, аппроксимирующие значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типов 1, 2 и 3 соответственно.

Представленные функции по сути являются математическим описанием закономерностей изменения значений коэффициента поглощения ЭМИ исследованных образцов в диапазоне частот 1,0–28,0 ГГц. Как видно из этих функций, зависимость коэффициента поглощения ЭМИ исследованных образцов от значения частоты ЭМИ в диапазоне 1,0–28,0 ГГц носит гиперболический характер.

Так, значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типа 1 увеличиваются на 0,15 при возрастании частоты ЭМИ в пределах от 1,0 до 2,0 ГГц, в среднем на 0,02 – при увеличении частоты ЭМИ в пределах от 3,0 до 13,0 ГГц и в среднем на 0,005 – при росте частоты ЭМИ в пределах от 13,0 до 28,0 ГГц.

В свою очередь значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типа 2 увеличиваются в среднем на 0,2 при возрастании частоты ЭМИ в пределах от 1,0 до 4,0 ГГц и в среднем на 0,03 – при росте частоты ЭМИ в пределах от 4,0 до 28,0 ГГц.

Между тем значения коэффициента поглощения ЭМИ образцов типа 3 увеличиваются в среднем на 0,05 при возрастании частоты ЭМИ в пределах от 1,0 до 2,0 ГГц и от 3,0 до 6,0 ГГц и в среднем на 0,005 при увеличении частоты ЭМИ в пределах от 6,0 до 28,0 ГГц.

Значения коэффициента поглощения ЭМИ увеличиваются с возрастанием частоты ЭМИ в связи с уменьшением глубины проникновения этого излучения [17].

В ходе исследования установлено, что значения коэффициента поглощения ЭМИ исследованных поглотителей выше, чем у аналогов (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Характеристики исследованных поглотителей электромагнитного излучения (ЭМИ) и их аналогов

Table 2. Characteristics of the studied electromagnetic radiation absorbers and their analogues

Краткое описание поглотителей ЭМИ	Значения коэффициента поглощения ЭМИ, дБ	Рабочий диапазон частот, ГГц
Исследованные поглотители ЭМИ	0,75–0,99	1,0–28,0
Поглотители ЭМИ с геометрическими неоднородностями поверхности в виде усеченных пирамид высотой 0,6 см, изготовленные из метаматериала [18]	0,7–0,9	3,0–4,0
Поглотители ЭМИ с геометрическими неоднородностями поверхности в виде пирамид высотой 1,0 см, изготовленные на основе полиуретана [3]	0,80–0,99	1,0–20,0
Поглотители ЭМИ с геометрическими неоднородностями поверхности в виде пирамид высотой 11,5 см, изготовленные на основе рисовой шелухи [4]	0,80–0,99	2,0–6,0
Поглотители ЭМИ с геометрическими неоднородностями поверхности в виде пирамид высотой 0,9 см, изготовленные на основе углеродных волокон [6]	0,7–0,9	4,0–18,0

Заключение. Поглотители ЭМИ, результаты исследования которых представлены в настоящей работе, характеризуются следующими преимуществами по сравнению с аналогами:

– более широкий рабочий диапазон частот за счет того, что энергия ЭМИ частотой более 10,0 ГГц, рассеиваемого на частицах входящего в состав указанных поглотителей порошкообразного активированного древесного (березового) угля, превышает энергию излучения частотой более 10,0 ГГц, рассеиваемого на мелкодисперсных частицах электропроводящих и диэлектрических материалов, которые используются для изготовления поглотителей, аналогичных указанным [19];

– пониженная по сравнению с другими углеродосодержащими материалами стоимость за счет дешевизны входящего в состав указанных поглотителей порошкообразного активированного древесного (березового) угля (стоимость порошкообразного активированного угля минимум в 1,5 раза ниже стоимости других углеродосодержащих материалов, используемых в настоящее время для изготовления поглотителей ЭМИ);

– повышенная механическая прочность за счет того, что в структуру указанных поглотителей входят изготовленные из радиопрозрачного полимерного материала твердотельные формы, характеризующиеся отсутствием остроугольных вершин, которые могут повреждаться при оказываемом на них механическом воздействии.

Полученные поглотители ЭМИ представляются перспективными для использования в целях облицовки стен и потоков безэховых камер, а также создания внутренних перегородок для функционального зонирования пространства в таких камерах. При этом наиболее целесообразно применять поглотители ЭМИ, изготовленные на основе водного раствора поливинилацетата, так как они характеризуются более низкими значениями коэффициента поглощения ЭМИ, а также меньшей в 1,5–2,0 раза массой на единицу площади по сравнению с поглотителями, изготовленными на основе водного раствора гипса и полимерной мастики.

Список использованных источников

1. Effect on Source Signal Condition for Pyramidal Microwave Absorber Performance / H. Nornikman [et al.] // *Int. Conf. on Computer and Communication Engineering (ICCCE'10)*. – 2010. – Vol. 10. – P. 11–13. <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2010.5556825>
2. Rodriguez, V. Basic Rules for Indoor Anechoic Chamber Design [Measurements Corner] / V. Rodriguez // *IEEE Antennas Propag. Mag.* – 2016. – Vol. 58, № 6. – P. 82–93. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2609821>
3. Design of Microwave Pyramidal Absorber for Semi Anechoic Chamber in 1 GHz–20 GHz Range / Z. Ali [et al.] // *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* – 2020. – Vol. 2. – P. 22–29. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2020.02.03>
4. Enhanced Microwave Absorption of Rice Husk-Based Pyramidal Microwave Absorber with Different Lossy Base Layer / L. Y. Seng [et al.] // *IET Microwaves, Antennas & Propagation*. – 2020. – Vol. 14, iss. 3. – P. 215–222. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0571>
5. Investigate the Effect of Dielectric Properties on Microwave Absorption of Pyramidal Microwave Absorber / B. Vaganathan [et al.] // *J. Microw., Optoelectron. Electromagn. Appl.* – 2022. – Vol. 21, № 2. – P. 328–336. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2257631>
6. Electromagnetic Absorber Composite Made of Carbon Fibers Loaded Epoxy Foam for Anechoic Chamber Application / C. Méjean [et al.] // *Mater. Sci. Eng., B*. – 2017. – Vol. 220. – P. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.03.009>
7. Product Design From Waste: A Novel Eco-Efficient Pyramidal Microwave Absorber Using Rice Husks and Medium Density Fibreboard Residues / C. F. Jung [et al.] // *Waste Manage. (Oxford)*. – 2021. – Vol. 119. – P. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.047>
8. A New Fire-Resistant Thin Pyramidal Absorber Based Straw and Gypsum Powder for Cost-Effective EMC Test Chambers / I. B. Basyigit [et al.] // *Eng. Sci. Technol. Int. J.* – 2023. – Vol. 40. – Art. ID 101344. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101344>
9. Orakwue, S. I. Pyramidal Microwave Absorber Design for Anechoic Chamber in the Microwave Frequency Range of 1 GHz to 10 GHz / S. I. Orakwue, I. P. Onu // *Eur. J. Eng. Res. Sci.* – 2019. – Vol. 4, № 10. <http://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.10.1409>
10. Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding / O. V. Boiprav [et al.] // *Mag. Civ. Eng.* – 2023. – Vol. 117, № 1. – Art. ID 11709. <https://doi.org/10.34910/MCE.117.9>
11. Специальные цементы / Т. В. Кузнецова [и др.]. – СПб.: Стройиздат, 1997. – 314 с.
12. Resistance against Penetration of Electromagnetic Radiation for Ultra-Light Cu/Ni-Coated Polyester Fibrous Materials / K. Yang [et al.] // *Polymers (Basel)*. – 2020. – Vol. 12, № 9. – P. 2029. <https://doi.org/10.3390/polym12092029>
13. Electromagnetic Waves Absorbing Characteristics of Composite Material Containing Carbonyl Iron Particles / V. A. Zhuravlev [et al.] // *Mater. Sci. Appl.* – 2014. – Vol. 5, № 11. – P. 803–811. <https://doi.org/10.4236/msa.2014.511080>
14. Dielectric Properties of Heterogeneous Mineral Compositions Based on Bentonite and Gypsum / A. Morozov [et al.] // *Transp. Res. Procedia*. – 2023. – Vol. 68. – P. 947–954. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.132>
15. Funt, B. L. Dielectric Properties of Polyvinyl Acetals / B. L. Funt, T. H. Sutherland // *Can. J. Chem.* – 1952. – Vol. 30, № 12. – P. 940–947. <https://doi.org/10.1139/v52-114>

16. The Rational Design of Polyurea & Polyurethane Dielectric Materials / R. G. Lorenzini [et al.] // *Polymer*. – 2013. – Vol. 54, iss. 14. – P. 3529–3533. <https://dx.doi.org/10.1016/j.polymer.2013.05.003>
17. Chung, D. D. L. Electromagnetic Skin Depth of Cement Paste and Its Thickness Dependence / D. D. L. Chung, M. Ozturk // *J. Build. Eng.* – 2022. – Vol. 52. – Art. ID 104393. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104393>
18. Pyramidal Metamaterial Absorber for Mode Damping in Microwave Resonant Structures / N. Chikhi [et al.] // *Sci. Rep.* – 2020. – Vol. 10. – Art. ID 19352. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76433-3>
19. Microwave Absorption Performance of Porous Carbon Particles Modified by Nickel with Different Morphologies / Z. Shen [et al.] // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2023. – Vol. 137. – P. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.07.036>

References

1. Nornikman H., Malek F., Soh P. J., Azremi A. A. H. Effect on Source Signal Condition for Pyramidal Microwave Absorber Performance. *International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE'10)*, 2010, vol. 10, pp. 11–13. <https://doi.org/10.1109/ICCCE.2010.5556825>
2. Rodriguez V. Basic Rules for Indoor Anechoic Chamber Design [Measurements Corner]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2016, vol. 58, no. 6, pp. 82–93. <https://doi.org/10.1109/MAP.2016.2609821>
3. Ali Z., Muneer B., Chowdhry B. S., Jehangir S., Hyder G. Design of Microwave Pyramidal Absorber for Semi Anechoic Chamber in 1 GHz~20 GHz Range. *International Journal Wireless and Microwave Technologies*, 2020, vol. 2, pp. 22–29. <https://doi.org/10.5815/ijwmt.2020.02.03>
4. Seng L. Y., Jack S. P., Yeow Y. K., Hoon W. F., Yew L. C., Seng G. H., Malek F. Enhanced Microwave Absorption of Rice Husk-Based Pyramidal Microwave Absorber with Different Lossy Base Layer. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2020, vol. 14, iss. 3, pp. 215–222. <https://doi.org/10.1049/iet-map.2019.0571>
5. Vaganathan B., Lee Y. S., You K. Y., Gan H. S., Wee F. H. Investigate the Effect of Dielectric Properties on Microwave Absorption of Pyramidal Microwave Absorber, *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 328–336. <http://doi.org/10.1590/2179-10742022v21i2257631>
6. Méjean C., Pometcu L., Benzerger R., Sharaiha A., Le Paven-Thivet C., Badard M., Pouliguen P. Electromagnetic Absorber Composite Made of Carbon Fibers Loaded Epoxy Foam for Anechoic Chamber Application. *Materials Science and Engineering: B*, 2017, vol. 220, pp. 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2017.03.009>
7. Jung C. F., Jesus Pacheco D. A. de, Sporket F., Nascimento C. A. do, Ten Caten C. S. Product Design From Waste: A Novel Eco-Efficient Pyramidal Microwave Absorber Using Rice Husks and Medium Density Fibreboard Residues. *Waste Management*, 2021, vol. 119, pp. 91–100. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.08.047>
8. Basyigit I. B., Dogan H., Genc A., Colak B. A New Fire-Resistant Thin Pyramidal Absorber Based Straw and Gypsum Powder for Cost-Effective EMC Test Chambers. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2023, vol. 40, art. ID 101344. <https://doi.org/10.1016/j.jestech.2023.101344>
9. Orakwue S. I., Onu I. P. Pyramidal Microwave Absorber Design for Anechoic Chamber in the Microwave Frequency Range of 1 GHz to 10 GHz. *European Journal of Engineering Research and Science*, 2019, vol. 4, no. 10. <http://doi.org/10.24018/ejers.2019.4.10.1409>
10. Boiprav O. V., Belousova E. S., Ahmetdinova E. S., Bogush N. V. Charcoal-Containing Building Materials for Electromagnetic Radiation Shielding. *Magazine of Civil Engineering*, 2023, vol. 117, no. 1, art. ID 11709. <https://doi.org/10.34910/MCE.117.9>
11. Kuznetsova T. V., Sychev M. M., Osokin A. P., Korneev V. I., Sudakas L. G. *Special Cements*. St. Petersburg, Stroiizdat Publ., 1997. 314 p. (in Russian).
12. Yang K., Periyasamy A. P., Venkataraman M., Militky J., Kremenakova D., Vecernik J., Pulíček R. Resistance against Penetration of Electromagnetic Radiation for Ultra-Light Cu/Ni-Coated Polyester Fibrous Materials. *Polymers (Basel)*, 2020, vol. 12, no. 9, p. 2029. <https://doi.org/10.3390/polym12092029>
13. Zhuravlev V. A., Suslyayev V. I., Korovin E. Yu., Dorozhkin K. V. Electromagnetic Waves Absorbing Characteristics of Composite Material Containing Carbonyl Iron Particles. *Materials Sciences and Applications*, 2014, vol. 5, no. 11, pp. 803–811. <https://doi.org/10.4236/msa.2014.511080>
14. Morozov A., Vasilchenko A., Shapovalov V., Kochur A., Yavna V. Dielectric Properties of Heterogeneous Mineral Compositions Based on Bentonite and Gypsum. *Transportation Research Procedia*, 2023, vol. 68, pp. 947–954. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.02.132>
15. Funt B. L., Sutherland T. H. Dielectric Properties of Polyvinyl Acetals. *Canadian Journal of Chemistry*, 1952, vol. 30, no. 12, pp. 940–947. <https://doi.org/10.1139/v52-114>
16. Lorenzini R. G., Kline W. M., Wang C. C., Ramprasad R., Sotzing G. A. The Rational Design of Polyurea & Polyurethane Dielectric Materials. *Polymer*, 2013, vol. 54, iss. 14, pp. 3529–3533. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.05.003>

17. Chung D. D. L., Ozturk M. Electromagnetic Skin Depth of Cement Paste and Its Thickness Dependence. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 52, art. ID 104393. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104393>
18. Chikhi N., Passarelli A., Andreone A., Masullo M. R. Pyramidal Metamaterial Absorber for Mode Damping in Microwave Resonant Structures. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, art. ID 19352. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-76433-3>
19. Shen Z., Zu Y., Chen Y., Gong J., Sun C. Microwave Absorption Performance of Porous Carbon Particles Modified by Nickel with Different Morphologies. *Journal of Materials Science & Technology*, 2023, vol. 137, pp. 79–90. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2022.07.036>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**
MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-28-38>
УДК 621.92.941.95.005Оригинальная статья**Б. М. Базров¹, М. Л. Хейфец^{2*}**¹*Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук,
Малый Харитоньевский переулок, 4, 101000, Москва, Российская Федерация*²*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь***МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ
КОНСТРУКЦИИ ИЗДЕЛИЯ**

Аннотация. В связи с кастомизацией производства особенно актуальной становится отработка конструкции изделия на технологичность на всех стадиях его создания. Предлагается метод повышения технологичности конструкции изделия на этапе разработки рабочей документации изделия, базирующийся на ее оценке посредством суммирования коэффициентов технологичности. Метод заключается в построении регрессионного ряда характеристик конструкции изделия по степени снижения их влияния на трудоемкость конструкции и установлении последовательности ее улучшения. Рекомендовано для повышения технологичности и снижения трудоемкости изготовления изделия обращать внимание сначала на методы достижения точности при сборке, а также использование в сборках максимального количества покупных деталей; затем на повторяемость видов соединений деталей в конструкции, снижение количества видов и трудоемкости выполнения соединений и в конце на повторяемость деталей в общей конструкции, максимальное использование заимствованных деталей. Показано, что типизацией процессов и унификацией конструктивных элементов эффективно заниматься на уровне крупных объединений (холдингов, концернов) и особенно отраслей промышленности.

Ключевые слова: конструкция изделия, характеристика конструкции, технологичность конструкции, коэффициент технологичности, трудоемкость изготовления

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии доктор технических наук, профессор М. Л. Хейфец.

Информация об авторах: *Базров Борис Мухтарбекович* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией «Теория модульной технологии» Института машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук. E-mail: modul_lab@mail.ru; *Хейфец Михаил Львович** – доктор технических наук, профессор, директор Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>. E-mail: mlk-z@mail.ru

Вклад авторов: *Базров Борис Мухтарбекович* – разработка и апробация метода повышения технологичности конструкции изделия на этапе создания его рабочей документации, редактирование рукописи; *Хейфец Михаил Львович* – выработка рекомендаций по повышению технологичности конструкции изделия в зависимости от масштабов его производства, написание текста статьи.

Для цитирования: Базров, Б. М. Метод повышения производственной технологичности конструкции изделия / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 28–38. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-28-38>

Поступила в редакцию: 17.08.2023

Утверждена к публикации: 30.11.2023

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

Boris M. Bazrov¹, Mikhail L. Kheifetz^{2*}

¹*Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences,
4, Maly Kharitonyevsky Pereulok, 101000, Moscow, Russian Federation*

²*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

**METHOD OF IMPROVING THE PRODUCTION MANUFACTURABILITY
OF THE PRODUCT DESIGN**

Abstract. Due to the customization of production, it becomes especially important to test the design of the product for manufacturability at all stages of its creation. A method is proposed to improve the manufacturability of the product design at the stage of developing the working documentation of the product, based on its evaluation by summing the coefficients of manufacturability. The method consists in constructing a regression series of product design characteristics according to the degree of reduction of their impact on the complexity of the design and establishing the sequence of its improvement. It is recommended to improve manufacturability and reduce the labor intensity of manufacturing a product, to pay attention from the beginning to methods for achieving accuracy during assembly, as well as the use of the maximum number of purchased parts in assemblies; then on the repeatability of the types of connections of parts in the design, reducing the number of types and laboriousness of making connections, and finally on the repeatability of parts in the overall design, the maximum use of borrowed parts. It is shown that the typification of processes and the unification of structures can be effectively dealt with at the level of large associations (holdings, concerns) and especially industries.

Keywords: product design, characteristics product design, manufacturability product design, coefficient of manufacturability, labor intensity

Conflict of interest: the author's team includes the member of the Editorial Board Dr. Sci. (Engineering), Professor Mikhail L. Kheifetz.

Information about the authors: *Boris M. Bazrov* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory “Theory of Modular Technology” at Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences. E-mail: modul_lab@mail.ru; *Mikhail L. Kheifetz** – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-6942-3605>. E-mail: mlk-z@mail.ru

Contribution of the authors: *Boris M. Bazrov* – development and testing of a method for improving the manufacturability of a product design at the stage of creating its working documentation, editing the manuscript; *Mikhail L. Kheifetz* – development of recommendations for improving the manufacturability of a product design depending on the scale of its production, writing the text of the article.

For citation: Bazrov B. M., Kheifetz M. L. Method of improving the production manufacturability of the product design. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 28–38 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-28-38>

Received: 17.08.2023

Approved for publication: 30.11.2023

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. Производственная технологичность конструкции изделия (ТКИ) определяет трудоемкость его изготовления [1, 2]. В связи с этим важна отработка конструкции изделия на технологичность на всех стадиях создания изделия: при разработке технического предложения, эскизного проекта, технического проекта, рабочей конструкторской документации опытного образца и серийного изделия и при технологической подготовке производства [3, 4]. На первых трех стадиях создания изделия повышение ТКИ осуществляется на основе рекомендации технолога и отличается невысокой эффективностью, так как на этих стадиях недостаточно информации о конструкции изделия (КИ). Наиболее эффективным является повышение уровня технологичности, начиная со стадии разработки рабочей документации на КИ, потому что на этой стадии имеется полная информация о конструкции [4, 5].

Цель исследования – разработка и применение методики повышения уровня технологичности конструкции изделия на стадии подготовки конструкторской документации.

Процесс отработки конструкции на технологичность на этой стадии может производиться конструктором без участия технолога в автоматическом режиме с использованием программных средств. Поэтому особенно актуальны разработка и применение предельно формализованной методики принятия конструкторско-технологических решений при цифровизации производства [6, 7] и для сквозной компьютерной поддержки жизненного цикла изделия [8, 9].

Метод интегрированной оценки технологичности конструкции изделия. Широко распространены два метода оценки уровня ТКИ [4]. Первый метод заключается в определении уровня

данного параметра изделия с помощью основных показателей эффективности производства, таких как трудоемкость и технологическая себестоимость. Второй метод состоит в оценке уровня ТКИ с помощью коэффициентов технологичности, таких как коэффициенты стандартизации, повторяемости, точности обработки и др. Данная оценка должна показывать влияние на трудоемкость не только конструкции изделия, но и ее характеристик.

Первый метод дает возможность получить ответ на вопрос, соответствует ли уровень ТКИ нового изделия заданному значению технологичности, но не показывает, какие характеристики КИ и в какой степени влияют на трудоемкость ее изготовления. Это является существенным недостатком при оценке уровня ТКИ, так как не позволяет определить, с каких характеристик и в какой последовательности следует улучшать их значения, чтобы достигнуть заданного уровня технологичности.

Второй метод оценки уровня ТКИ позволяет не только определить уровень технологичности, но и установить, какие характеристики конструкции изделия и в какой степени влияют на полную трудоемкость ее изготовления. Однако это преимущество не используется, так как известные расчетные формулы коэффициентов технологичности не отражают степени влияния соответствующих характеристик КИ на трудоемкость изготовления изделия.

В результате оценка уровня ТКИ осуществляется технологом, который выбирает из известных коэффициенты для определения уровня технологичности конструкции разрабатываемого и внедряемого в производство изделия. Поэтому точность оценки уровня ТКИ напрямую зависит от опыта и квалификации данного специалиста.

Принимая во внимание преимущества второго метода определения ТКИ, а также с целью устранения его недостатков разработан метод интегральной оценки уровня технологичности конструкции посредством суммирования коэффициентов технологичности [4, 10, 11]. Для реализации данного метода определен перечень коэффициентов технологичности (К) и соответствующие характеристики (Х), которые они отражают:

коэффициент покупаемости ($K_{\text{ПОК}}$) – количество покупаемых деталей;
коэффициент заимствования (K_3) – количество заимствованных деталей;
коэффициент повторяемости деталей ($K_{\text{ПВД}}$) – количество повторяемых деталей;
коэффициент повторяемости соединений ($K_{\text{ПВС}}$) – количество повторяемых соединений деталей;
коэффициент типизации ($K_{\text{ТИП}}$) – количество типовых унифицированных деталей;
коэффициент точности деталей ($K_{\text{ТЧ}}$) – уровень точности деталей;
коэффициент шероховатости ($K_{\text{Ш}}$) – уровень шероховатости поверхностей деталей;
коэффициент твердости ($K_{\text{ТВ}}$) – уровень твердости материала деталей;
коэффициент массы ($K_{\text{М}}$) – уровень массы деталей;
коэффициент соединения ($K_{\text{С}}$) – количество видов соединений;
коэффициент методов точности замыкающих звеньев ($K_{\text{МРЦ}}$) – количество методов достижения точности замыкающих звеньев размерных цепей.

Коэффициенты технологичности, отражающие степень влияния характеристик конструкции изделия. Расчетные формулы перечисленных коэффициентов технологичности отражают степени влияния характеристик КИ на снижение трудоемкости изготовления изделия.

В основу разработки расчетных формул коэффициентов технологичности положены связи между характеристиками КИ и их влиянием на полную трудоемкость изготовления изделий (табл. 1).

Принимая во внимание связи между характеристиками и механизмом их влияния на полную трудоемкость изготовления изделия (см. табл. 1), предложим расчетные формулы коэффициентов технологичности.

Коэффициент покупаемости ($K_{\text{ПОК}}$):

$$K_{\text{ПОК}} = a_1 a_{1.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_1 a_{1.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + \\ + a_2 a_{2.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.2} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D} + a_2 a_{2.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D},$$

где $a_1 = T_1/T$; $a_2 = T_2/T$; $a_{1.1} = T_{1.1}/T_1$; $a_{1.3} = T_{1.3}/T_1$; $a_{2.1} = T_{2.1}/T_2$; $a_{2.2} = T_{2.2}/T_2$; $a_{2.3} = T_{2.3}/T_2$; D – количество деталей в изделии, шт.; $D_{\text{ПОК}i}$ – i -я покупная деталь; $b_{\text{СЛ}i}$ – коэффициент сложности i -й конструкции $D_{\text{ПОК}}$.

Таблица 1. Влияние коэффициентов технологичности на трудоемкость
 Table 1. The effect of the coefficients of manufacturability on labor intensity

Коэффициент технологичности The coefficient of manufacturability	Вид трудоемкости (T _i) Type of labor intensity (T _i)								
	T ₁			T ₂					
	T _{1.1}	T _{1.2}	T _{1.3}	T _{2.1}	T _{2.2}	T _{2.3}	T _{2.4}	T _{2.5}	T _{2.6}
K _{ПОК}	■		■	■	■	■			
K _з	■		■						
K _{ПВД}	■			■					
K _{ПВС}		■	■				■		
K _{ТИП}	■		■						
K _{ТЧ}					■				
K _Ш					■				
K _{ТВ}					■				
K _М						■			■
K _С								■	
K _{МРЦ}		■						■	

Примечание: T₁ – трудоемкость технологической подготовки производства, T₂ – трудоемкость изготовления изделия, T_{1.1} – трудоемкость разработки изготовления деталей, T_{1.2} – трудоемкость разработки технологических процессов соединения деталей, T_{1.3} – трудоемкость разработки и изготовления технологической оснастки, T_{2.1} – трудоемкость подготовительно-заключительных работ при обработке заготовок, T_{2.2} – трудоемкость технологических переходов обработки заготовок, T_{2.3} – трудоемкость вспомогательных переходов обработки заготовок, T_{2.4} – трудоемкость подготовительно-заключительных работ при соединении деталей, T_{2.5} – трудоемкость технологических переходов соединения деталей, T_{2.6} – трудоемкость вспомогательных переходов соединения деталей.

Note: T₁ – the complexity of technological preparation of production, T₂ – the complexity of manufacturing products, T_{1.1} – the complexity of the development of manufacturing parts, T_{1.2} – the complexity of the development of technological processes of connecting parts, T_{1.3} – the complexity of the development and manufacture of technological equipment, T_{2.1} – the complexity of preparatory and final work in the processing of workpieces, T_{2.2} – the complexity of technological transitions of workpiece processing, T_{2.3} – the complexity of auxiliary transitions of workpiece processing, T_{2.4} – the complexity of preparatory and final work when connecting parts, T_{2.5} – the complexity of technological transitions connecting parts, T_{2.6} – the complexity of auxiliary transitions of connecting parts.

Коэффициент заимствования (K_з):

$$K_z = a_{1.1} a'_{1.1} \frac{\sum D_{zi} b_{cли}}{D - D_{ПОК}} + a_{1.3} a'_{1.3} \frac{\sum D_{zi} b_{cли}}{D - D_{ПОК}},$$

где $a'_{1.1} = a_{1.1} - a_{1.1} \frac{\sum D_{ПОК i} b_{cли}}{D}$; $a'_{1.3} = a_{1.3} - a_{1.3} \frac{\sum D_{ПОК i} b_{cли}}{D}$; D_{зи} – i-я заимствованная деталь; b_{cли} – коэффициент сложности конструкции D_{зи}; D_{ПОК} – количество покупных деталей в изделии, шт.;

Коэффициент повторяемости деталей (K_{ПВД}):

$$K_{ПВД} = a_{1.1} a''_{1.1} \frac{\sum (D_{ПВД j} - 1) b_{cли} - \sum (D_{ПВД zi} - 1) b_{cли}}{D - D_{ПОК} - D_3} +$$

$$+ a_1 a_{1.3}'' \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{СЛ}i} - \sum (D_{\text{ПВД}3j} - 1)_i b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}} - D_3} + a_2 a_{2.1}' \frac{\sum (D_{\text{ПВД}j} - 1)_i b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}}},$$

где $a_{1.1}'' = a_{1.1}' - a_{1.1}' \frac{\sum D_{3i} b_{\text{СЛ}i}}{D - D_{\text{ПОК}}}$; $a_{1.3}'' = a_{1.3}' - a_{1.3}' \frac{\sum D_{3i} b_{3i}}{D - D_{\text{ПОК}}}$; $a_{2.1}' = a_{2.1} - a_{2.1} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}$; $D_{\text{ПВД}j} - j$ -е число повторяемых деталей i -й группы наименования; $D_{\text{ПВД}3j} - j$ -е число повторяемых заимствованных деталей i -й группы наименования.

Коэффициент повторяемости соединений ($K_{\text{ПВС}}$):

$$K_{\text{ПВС}} = a_1 a_{1.2} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{\text{С}i}}{C} + a_1 a_{1.3}'' \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{\text{С}i}}{C} + a_2 a_{2.4} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{\text{С}i}}{C},$$

где $a_{1.2} = T_{1.2}/T_1$; $a_{2.4} = T_{2.4}/T_2$; $a_{1.3}''' = a_{1.3}'' - a_{1.3}'' \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}$; C – общее количество соединений в изделии; $C_{\text{ПВС}j} - j$ -е количество повторяемых соединений i -й группы одного наименования; $b_{\text{С}i}$ – коэффициент, учитывающий влияние вида соединения на трудоемкость его изготовления.

Коэффициент типизации ($K_{\text{ТИП}}$):

$$K_{\text{ТИП}} = a_1 a_{1.1}''' \frac{D_{\text{ТИП}} b_{\text{СЛ.СР}}}{D_{\text{СОБ}}},$$

где $a_{1.1}''' = a_{1.1}'' - a_{1.1}'' \frac{D_{\text{ТИП}} b_{\text{СЛ.СР}}}{D_{\text{СОБ}}}$; $D_{\text{ТИП}}$ – количество типовых унифицированных деталей в КИ; $D_{\text{СОБ}}$ – количество собственных деталей КИ за исключением покупных, заимствованных и повторяемых; $b_{\text{СЛ.СР}}$ – коэффициент, показывающий средний уровень сложности типовых деталей.

Коэффициент точности ($K_{\text{ТЧ}}$):

$$K_{\text{ТЧ}} = a_2 a_{2.2}' \left(1 - \frac{S}{\sum A_i b_{\text{ТЧ}i} S_i} \right),$$

где $a_{2.2}' = a_{2.2} - a_{2.2} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}$; A_i – i -й квалитет точности размера поверхности, к которому предъявляются наиболее высокие требования точности; S – общая площадь всех поверхностей изготавливаемых деталей; S_i – i -я площадь поверхностей A_i .

Коэффициент шероховатости ($K_{\text{Ш}}$):

$$K_{\text{Ш}} = a_2 a_{2.2}' \left(1 - \frac{S}{\sum B_i b_{\text{Ш}i} S_i} \right),$$

где B_i – параметр шероховатости i -й поверхности деталей в изделии; $b_{\text{Ш}i}$ – коэффициент, учитывающий трудоемкость достижения параметра B_i при обработке детали, изменяется от нуля до единицы.

Коэффициент твердости ($K_{\text{ТВ}}$):

$$K_{\text{ТВ}} = a_2 a_{2.2}' \left(\frac{\sum S_{\text{ТВ}i} b_{\text{ТВ}i}}{S} \right),$$

где $S_{\text{ТВ}i}$ – площадь поверхности непокупных деталей с i -й твердостью материала изделия; $b_{\text{ТВ}i}$ – коэффициент, учитывающий влияние твердости i -го материала КИ.

Коефіціент масы (K_M):

$$K_M = a_2 a'_{2.3} \left(\frac{\sum D_{Mi} b_{Mi}}{D_M} \right) + a_2 a_{2.6} \left(\frac{\sum D_{Mi} b_{Mi}}{D_M} \right),$$

дзе $a'_{2.3} = a_{2.3} - a_{2.3} \frac{\sum D_{\text{ПОК}i} b_{\text{СЛ}i}}{D}$; $a_{2.6} = T_{2.1}/T_2$; D_{Mi} – количество деталей и сборочных единиц в КИ i -й массы; b_{Mi} – коэффициент влияния i -й массы деталей и сборочной единицы в КИ на соответствующий подвид трудоемкости ее изготовления; D_M – количество деталей и сборочных единиц в КИ.

Коефіціент соединения (K_C):

$$K_C = a_2 a_{2.5} \left(\frac{\sum l_{3i} b_{3i} + \sum l_{Hi} b_{Hi} + \sum l_{Pi} b_{Pi} + \sum l_{\text{СВ}i} b_{\text{СВ}i} + \sum l_{Ki} b_{Ki} + \sum l_{\text{КЛ}i} b_{\text{КЛ}i}}{L} \right),$$

дзе $a_{2.5} = T_{2.5}/T_2$; l_{3i} , l_{Pi} , l_{Hi} , $l_{\text{СВ}i}$, l_{Ki} , $l_{\text{КЛ}i}$ – длины i -х соединений соответственно с зазором, резьбового, с натягом, сварного, клеевого и клепаного; L – общая длина всех соединений деталей в изделии; b_{3i} , b_{Pi} , b_{Hi} , $b_{\text{СВ}i}$, b_{Ki} , $b_{\text{КЛ}i}$ – степени влияния на трудоемкость i -го соединения соответственно с зазором, резьбового, с натягом, сварного, клеевого и клепаного.

Коефіціент методов точности размерной цепи ($K_{\text{М.Р.Ц}}$):

$$K_{\text{М.Р.Ц}} = a_1 a'_{1.2} \frac{\text{ПВ}b_{\text{Р.ПВ}} + \text{НП}b_{\text{Р.НП}} + \text{ГВ}b_{\text{Р.ГВ}} + \text{РЕ}b_{\text{Р.РЕ}} + \text{ПР}b_{\text{Р.ПР}}}{n_{\text{М.Р.Ц}}} +$$

$$+ a_2 a'_{2.5} \frac{\text{ПВ}b_{\text{ИЗ.ПВ}} + \text{НП}b_{\text{ИЗ.НП}} + \text{ГВ}b_{\text{ИЗ.ГВ}} + \text{РЕ}b_{\text{ИЗ.РЕ}} + \text{ПР}b_{\text{ИЗ.ПР}}}{n_{\text{М.Р.Ц}}},$$

дзе $a'_{1.2} = a_{1.2} - a_{1.2} \frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{\text{С}i}}{C}$; $a'_{2.5} = a_{2.5} - a_{2.5} \left(\frac{\sum (C_{\text{ПВС}j} - 1)_i b_{\text{С}i}}{C} \right)$; ПВ, НП, ГВ, РЕ, ПР – количество размерных цепей, собирающихся соответственно методом полной, неполной и групповой взаимозаменяемости, регулировки и пригонки; $n_{\text{М.Р.Ц}}$ – общее число размерных цепей в КИ; $b_{\text{Р.ПВ}}$, $b_{\text{Р.НП}}$, $b_{\text{Р.ГВ}}$, $b_{\text{Р.РЕ}}$, $b_{\text{Р.ПР}}$ – коэффициенты, учитывающие влияние на снижение трудоемкости $T_{1.2}$ метода соответственно неполной и групповой взаимозаменяемости, регулировки и пригонки; $b_{\text{ИЗ.ПВ}}$, $b_{\text{ИЗ.НП}}$, $b_{\text{ИЗ.ГВ}}$, $b_{\text{ИЗ.РЕ}}$, $b_{\text{ИЗ.ПР}}$ – коэффициенты влияния на трудоемкость изготовления КИ соответственно метода полной, неполной и групповой взаимозаменяемости, регулировки и пригонки.

Методика определения уровня технологичности конструкции изделия. Методика определяет уровень ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности:

$$\text{ТКИ} = K_{\text{ПОК}} + K_3 + K_{\text{ПВД}} + K_{\text{ПВС}} + K_{\text{ТИП}} + K_M + K_C + K_{\text{МРЦ}} + K_{\text{min}},$$

где K_{min} – наименьшее значение одного из коэффициентов $K_{\text{ТЧ}}$, $K_{\text{Ш}}$, $K_{\text{ГВ}}$, так как их влияние на трудоемкость проявляется через один и тот же фактор – режим обработки.

Зная значения всех перечисленных коэффициентов технологичности, их выстраивают в регрессионный ряд по степени снижения их влияния на полную трудоемкость изготовления КИ, а следовательно, и регрессионный ряд характеристик конструкции. Наличие последнего ряда показывает, с каких характеристик и в какой последовательности надо улучшать их значения, чтобы достигать заданный уровень ТКИ.

Исходными данными для построения указанного ряда коэффициентов технологичности являются их значения. Методика построения регрессионного ряда характеристик КИ включает следующие этапы:

- 1) построение ряда по степени влияния коэффициентов на снижение трудоемкости изготовления КИ;
- 2) определение резерва возможного увеличения влияния каждого коэффициента на снижение трудоемкости изготовления КИ;
- 3) построение регрессионного ряда коэффициентов по совместному влиянию их резервов и степени влияния на снижение трудоемкости изготовления КИ;
- 4) определение регрессионного ряда характеристик КИ по коэффициентам совместного влияния.

Таким образом, обработку КИ на технологичность следует начинать с улучшения характеристик конструкции согласно их регрессионному ряду, в котором резерв каждой из характеристик определяется как разность максимального и расчетного значений соответствующих им коэффициентов технологичности.

Максимальное значение коэффициента технологичности определяется следующим образом. Расчетная формула любого коэффициента технологичности представляет произведение $a_i a_{ij}$ (a_i – степень влияния вида трудоемкости на полную трудоемкость изготовления изделия; a_{ij} – степень влияния подвида трудоемкости на вид трудоемкости изготовления изделия) и множителя, отражающего соответствующую характеристику КИ.

Например, для точности максимальное значение $K_{Тч\max}$ будет при наибольшем значении дроби, когда квалитет равен 18 (ГОСТ 25346–89 «Основные нормы взаимозаменяемости. Единая система допусков и посадок. Общие положения, ряды допусков и основных отклонений»), тогда резерв изменения характеристики (точность деталей КИ) можно определить по формуле

$$\Delta K_{Тч} = K_{Тч\max} - K_{Тчр},$$

где $K_{Тч\max}$ – максимальное значение $K_{Тч}$; $K_{Тчр}$ – расчетное значение точности КИ.

Аналогично определяются резервы улучшения остальных характеристик конструкции изделия. Далее определяется коэффициент технологичности с учетом его влияния и резерва возможного изменения на снижения трудоемкости КИ по формуле

$$B_i = a_i a_{ij} \Delta K_i,$$

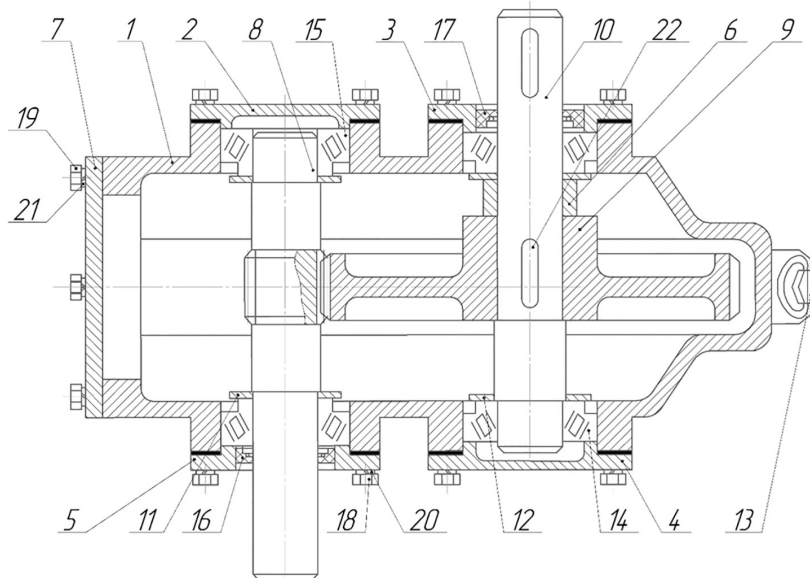
где ΔK_i – резерв изменения i -го коэффициента технологичности.

После определения значения каждого коэффициента технологичности строится регрессионный ряд коэффициентов технологичности и, следовательно, характеристик КИ.

Пример повышения технологичности изделия общетехнического назначения и обобщенные рекомендации по повышению технологичности конструкций. Рассмотрим построение регрессионного ряда характеристик КИ по изложенной методике на примере цилиндрического редуктора (см. рисунок), для которого исходными данными являются характеристики конструкции (табл. 2) и значения входящих в расчетные формулы аргументов: $a_i, a_{ij}, b_i, D, D_{Покi}, D_{зi}, D_{ПВДi}, D_{ПВДzi}, D_{тип}, D_{Соб}, b_{Сли}, S, S_i, ПВ, НП, РЕ, ПР, ГВ, l_{zi}, l_{Hi}, l_{Pi}, l_{СВi}, l_{Ki}, l_{Кли}, C_{ПВСi}, b_{Ci}, C, D_{Mi}, D_M, b_{Mi}, S_{ТВи}$.

Получены расчетные значения коэффициентов технологичности и ТКИ цилиндрического редуктора: $K_{Пок} = 0,033; K_з = 0,031; K_{ПВД} = 0,100; K_{ПВС} = 0,082; K_{тип} = 0,005; K_{Тч} = 0,089; K_{ш} = 0,095; K_{ТВ} = 0,103; K_M = 0,063; K_C = 0,111; K_{МРЦ} = 0,096; ТКИ = 0,8$.

Далее построен регрессионный ряд коэффициентов технологичности по степени их влияния на снижение трудоемкости изготовления КИ. Для каждого коэффициента технологичности определен резерв и построен регрессионный ряд по степени снижения их влияния на трудоемкость КИ. Затем определены значения B_i , согласно которым построен регрессионный ряд коэффициентов технологичности (табл. 3).



Цилиндрический редуктор
 Cylindrical gearbox

Таблица 2. Характеристики деталей цилиндрического редуктора
 Table 2. Characteristics of cylindrical gearbox parts

№ детали на рисунке	Наименование детали	Количество деталей	Вид детали*	Количество размеров, шт.	Масса, кг	Твердость материала, НВ
1	Корпус	1	С	84	14,83	180
2	Крышка	1	С	9	0,36	160
3	Крышка	1	С	9	0,34	160
4	Крышка	1	С	13	0,45	160
5	Крышка	1	С	13	0,49	160
6	Втулка	1	С	3	0,35	160
7	Крышка	1	С	13	0,45	160
8	Вал-шестерня	1	С	30	2,34	210
9	Колесо	1	С	12	1,46	200
10	Вал	1	С	26	2,24	200
11	Маслоотражатель	2	З	5	0,15	120
12	Маслоотражатель	2	З	5	0,15	120
13	Пробка прокладка	2	З	8	0,3	120
13	Подшипник 7508	2	П	20	0,45	–
15	Подшипник 7808У	2	П	20	0,57	–
16	Манжета 1.1-35×58-1	1	П	3	0,01	–
17	Манжета 1.1-40×60-1	1	П	3	0,01	–
18	Болт М6×16.66.01.9	8	П	7	0,015	–
19	Болт М8×25.66.01.9	16	П	7	0,018	–
20	Шайба 6.65.Г.06.9	8	П	3	0,007	–
21	Шайба 8.65.Г.06.9	16	П	3	0,008	–
22	Шпонка 12×8×56	1	П	5	0,340	–

*С – собственная деталь; З – заимствованная деталь; П – покупная деталь.

*С – own part; З – borrowed part; П – purchased part.

Т а б л и ц а 3. Регрессионные ряды коэффициентов технологичности

T a b l e 3. Regression series of processability coefficients

<i>Регрессионный ряд коэффициентов технологичности по степени влияния на снижение трудоемкости изготовления КИ</i>											
K_i	K_C	$K_{ТВ}$	$K_{ПВД}$	$K_{МРЦ}$	$K_{Ш}$	$K_{ТЧ}$	$K_{ПВС}$	K_M	$K_{ПОК}$	K_3	$K_{ТИП}$
Значение K_i	0,111	0,103	0,100	0,096	0,095	0,089	0,082	0,063	0,033	0,031	0,005
<i>Регрессионный ряд коэффициентов технологичности по уменьшению величины резерва</i>											
K_i	$K_{ПОК}$	$K_{МРЦ}$	K_3	$K_{ПВС}$	K_C	$K_{ПВД}$	$K_{ТЧ}$	K_M	$K_{Ш}$	$K_{ТВ}$	$K_{ТИП}$
Значение ΔK_i	0,042	0,038	0,026	0,023	0,018	0,017	0,010	0,009	0,008	0,007	0,005
<i>Регрессионный ряд коэффициентов технологичности по уменьшению совместного влияния резерва и степени влияния на снижение трудоемкости его изготовления</i>											
K_i	$K_{МРЦ}$	$K_{ПОК}$	$K_{ПВС}$	K_C	$K_{ПВД}$	K_3	$K_{ТЧ}$	$K_{Ш}$	$K_{ТВ}$	K_M	$K_{ТИП}$
Значение B_i	0,004712	0,003150	0,002415	0,002322	0,001666	0,001482	0,000999	0,000824	0,000777	0,000666	0,000025

В соответствии с регрессионным рядом по уменьшению совместного влияния резерва и степени влияния на снижение трудоемкости его изготовления построен регрессионный ряд конструктивных характеристик (X) изделия:

$$X_{МРЦ} \rightarrow X_{ПОК} \rightarrow X_{ПВС} \rightarrow X_C \rightarrow X_{ПВД} \rightarrow X_3 \rightarrow X_{ТЧ} \rightarrow X_{Ш} \rightarrow X_{ТВ} \rightarrow X_M \rightarrow X_{ТИП}$$

Полученный ряд показывает, с какой характеристики, в какой последовательности и до какой характеристики КИ следует улучшать их значения для достижения заданного уровня технологичности конструкции цилиндрического редуктора, что позволяет повысить эффективность отработки КИ на технологичность.

По рассмотренному примеру для изделия общетехнического назначения видно, что для повышения ТКИ в подавляющем большинстве случаев и для снижения трудоемкости изготовления изделия наиболее целесообразно обращать внимание: во-первых, на методы достижения точности при сборке, а также использование в сборках максимального количества покупных деталей; во-вторых, на повторяемость видов соединений деталей в конструкции, снижение количества видов и трудоемкости выполнения соединений; в-третьих, на повторяемость деталей в общей конструкции, максимальное использование заимствованных деталей.

Вместе с тем вследствие уменьшения величины резерва минимальное влияние (в порядке убывания) на снижение трудоемкости изготовления изделия оказывают: геометрические характеристики поверхностей (точность и шероховатость); физико-механические свойства материала и изделия (твердость и масса); типизация и унификация деталей.

Последнее показывает, что типизацией процессов и унификацией конструкций не эффективно заниматься в рамках отдельного предприятия (особенно малого и среднего). При этом на уровне крупных объединений (холдингов, концернов), и особенно отраслей промышленности, это наиболее эффективный путь, о чем свидетельствуют первоочередные позиции по покупным и заимствованным конструкциям в соединениях деталей.

Заключение. Отработка конструкции изделия на технологичность на этапе разработки рабочей конструкторской документации в настоящее время осуществляется технологом совместно с конструктором, а ее результат зависит от их опыта и квалификации, что приводит к существенному росту трудоемкости данного процесса.

Предложен метод повышения эффективности процесса отработки КИ на технологичность, который базируется на оценке уровня ТКИ посредством суммирования коэффициентов технологичности, учитывающих степень их влияния на трудоемкость изготовления изделия, и позволяет построить регрессионный ряд характеристик конструкции изделия по степени их влияния на снижение трудоемкости его изготовления.

Регрессионный ряд характеристик конструкции дает возможность определить без участия специалистов, с какой характеристики, в какой последовательности и до какой характеристики КИ следует улучшать значения технологичности с целью достижения заданного уровня, что позволяет существенно повысить эффективность процесса отработки КИ на технологичность.

Список использованных источников

1. Корсаков, В. С. Основы технологии машиностроения / В. С. Корсаков. – М.: Машиностроение, 1977. – 416 с.
2. Базров, Б. М. Анализ метода оценки технологичности конструкции изделия как предмета производства / Б. М. Базров, А. А. Троицкий // Справочник. Инженерный журнал. – 2017. – № 4 (241). – С. 39–43. <https://doi.org/10.14489/hb.2017.04.pp.039-043>
3. Ross, D. T. Structured analysis for requirements definition / D. T. Ross, R. E. Schoman // IEEE Trans. Softw. Eng. – 1977. – Vol. SE-3, Iss. 1. – P. 6–15. <https://doi.org/10.1109/tse.1977.229899>
4. Assessment production manufacturability of the design in the product life cycle / В. М. Bazrov [et al.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 422–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-422-432>
5. Базров, Б. М. Метод представления изделия как объекта цифровизации производства структурированным множеством модулей / Б. М. Базров, М. Л. Хейфец // Докл. Нац. акад. наук Беларусі. – 2019. – Т. 63, № 3. – С. 377–384. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>
6. Additive Manufacturing for the Aerospace Industry / eds.: F. Fores, R. Boyer. – Cambridge: Elsevier, 2019. – 465 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00712-7>
7. Системология объектов и процессов при цифровизации жизненного цикла изделий машиностроения / Б. М. Базров [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларусі. – 2021. – Т. 65, № 4. – С. 516–525. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-503-512>
8. Delchambke, A. Computer-aided Assembly Planning / A. Delchambke. – London: Chapman & Hall, 1992. – 276 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2322-8>
9. Витязь, П. А. «Индустрия 4.0»: от информационно-коммуникационных и аддитивных технологий к самовоспроизведению машин и организмов / П. А. Витязь, М. Л. Хейфец, С. А. Чижик // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2017. – № 2. – С. 54–72.
10. Базров, Б. М. Метод суммирования коэффициентов производственной технологичности конструкции изделия / Б. М. Базров, А. А. Троицкий // Технология машиностроения. – 2020. – № 8. – С. 70–75.
11. Базров, Б. М. Базис технологической подготовки машиностроительного производства / Б. М. Базров. – М.: КУРС, 2023. – 324 с.

References

1. Korsakov V. S. *Fundamentals of Mechanical Engineering Technology*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 416 p. (in Russian).
2. Bazrov B. M., Troitsky A. A. Analysis of a method of assessment of technological effectiveness of a desing of a product, as production subject. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal = HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2017, no. 4 (241), pp. 39–43 (in Russian). <https://doi.org/10.14489/hb.2017.04.pp.039-043>
3. Ross D. T., Schoman R. E. Structured analysis for requirements definition. *IEEE Transactions on Software Engineering*, 1977, vol. SE-3, iss. 1, pp. 6–15. <https://doi.org/10.1109/tse.1977.229899>
4. Bazrov B. M., Kheifetz M. L., Hurevich V. L., Popok N. N. Assessment production manufacturability of the design in the product life cycle. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 422–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-422-432>
5. Bazrov B. M., Kheifetz M. I. Method of presenting a product as an object of digitalization of manufacturing by a structured set of modules. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2019, vol. 63, no. 3, pp. 377–384 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2019-63-3-377-384>
6. Fores F., Boyer R., eds. *Additive Manufacturing for the Aerospace Industry*. Cambridge, Elsevier, 2019. 465 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-00712-7>
7. Bazrov B. M., Kheifetz M. L., Hurevich V. L., Popok N. N. Systemology of objects and processes in digitalization of the life cycle of engineering products. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 4, pp. 503–512 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-4-503-512>

8. Delchambke A. *Computer-aided Assembly Planning*. London, Chapman & Hall, 1992. 276 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-2322-8>
9. Vitiaz P. A., Kheifetz M. L., Chizhik S. A. “Industry 4.0”: from information and communication and additive technologies to self-reproduction of machines and organisms. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2017, no. 2, pp. 54–72 (in Russian).
10. Bazrov B. M., Troitskii A. A. The method of summing the coefficients of production manufacturability of the product design. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2020, no. 8, pp. 70–75 (in Russian).
11. Bazrov B. M. *The Basis of Technological Preparation of Machine-Building Production*. Moscow, KURS Publ., 2023. 324 p. (in Russian).

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

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

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-39-52>
УДК 621.039.743



Оригинальная статья

**М. Л. Жемжуров, Г. М. Жмура*, И. Е. Рубин, Н. М. Днепровская, Н. А. Тетерева,
И. В. Руденков, Л. Ф. Бабичев**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси,
Луговослободской с/с, 47/17, 223063, д. Прилесье, Минский район,
Минская область, Республика Беларусь*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМОВ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ
В АКТИВИРОВАННЫХ РЕАКТОРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ВВЭР-1200**

Аннотация. Представлены результаты расчетных исследований количества твердых высокоактивных, среднеактивных, низкоактивных, очень низкоактивных радиоактивных отходов (соответственно ВАО, САО, НАО, ОНАО), образующихся при нейтронной активации материалов конструкций, прилегающих к активной зоне реакторной установки ВВЭР-1200, в зависимости от времени после окончательного ее останова. Оценка объемов радиоактивных отходов (РАО) активационного происхождения, образующихся за 60 лет эксплуатации реактора типа ВВЭР-1200, выполнена на основании расчетных исследований наведенной активности конструкционных и защитных материалов с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов (SERPENT 2, ТВС-М, DYN3D, MCU-PD). Рассчитаны удельные активности по каждому изотопу, суммарные удельные активности и активности, массы и объемы активированных конструкционных и защитных реакторных материалов для различных категорий РАО после указанного периода эксплуатации ВВЭР-1200 и с течением времени после окончательного останова реактора. Полученные зависимости изменений масс и объемов активированных материалов с течением времени после окончательного останова реактора позволяют определить эти параметры материалов отдельно для каждой категории РАО и в сумме на любой момент времени. Так, массы активированных материалов, относящиеся к РАО, за 200 лет выдержки уменьшатся на 264 т (от 713 до 449 т), а объемы – на 74,3 м³ (от 169 до 94,7 м³). Прогнозные количественные данные по объемам и массе активированных реакторных конструкций в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока позволят разработать технические предложения, прогнозные планы-графики по организации системы обращения с РАО в процессе вывода из эксплуатации реакторной установки ВВЭР-1200, а также возможные технологические и конструктивные решения по системе захоронения этих РАО.

Ключевые слова: радиоактивные отходы атомных электростанций, твердые радиоактивные отходы, категория твердых радиоактивных отходов, ВВЭР-1200, программные коды

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Жемжуров Михаил Леонидович – доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией радиационной безопасности объектов использования атомной энергии Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: jema@sosny.bas-net.by; Жмура Георгий Митрофанович* – старший научный сотрудник лаборатории радиационно-химических исследований окружающей среды Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: georgiyzhmura@mail.ru; Рубин Исаак Ефимович – старший научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: rubin@sosny.bas-net.by; Днепровская Нина Михайловна – научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Национальной академии наук Беларуси. E-mail: dneprnina@mail.ru; *Тетерева Наталья Александровна* – научный сотрудник лаборатории нейтронной физики Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: tetna@mail.ru; *Руденков Ивантон Владимирович* – младший научный сотрудник лаборатории моделирования суперкомпьютерных технологий в ядерной физике и энергетике Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: godder@tut.by; *Бабичев Леонид Филипович* – кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий лабораторией моделирования суперкомпьютерных технологий в ядерной физике и энергетике Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: babichev@sosny.bas-net.by

Вклад авторов: *Жемжуров Михаил Леонидович* – обоснование концепции исследования, постановка исследовательских целей из задач, формулировка выводов и интерпретация результатов, редактирование; *Жмура Георгий Митрофанович* – разработка методологии исследований, проведение вычислений, написание текста рукописи, формулировка выводов и интерпретация результатов; *Рубин Исаак Ефимович* – разработка методологии исследований, проведение вычислений и интерпретация результатов; *Днепровская Нина Михайловна* – проведение вычислений; *Тетерева Наталья Александровна* – проведение вычислений; *Руденков Ивантон Владимирович* – разработка методологии исследований, проведение вычислений; *Бабичев Леонид Филипович* – разработка методологии исследований, проведение вычислений.

Для цитирования: Определение объемов радиоактивных отходов в активированных реакторных конструкциях ВВЭР-1200 / М. Л. Жемжуров [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 39–52. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-39-52>

Поступила в редакцию: 10.07.2023

Доработанный вариант: 08.01.2024

Утверждена к публикации: 22.02.2024

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

**Mikhail L. Zhemzhurov, Georgy M. Zhmura*, Isaak E. Rubin, Nina M. Dneprovskaya,
Natalia A. Tetereva, Ivanton V. Rudenkov, Leonid F. Babichev**

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,
47/17, Lugovoslobodskaya village, 223063, Prilesye village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus*

DETERMINATION OF VOLUME OF RADIOACTIVE WASTE IN ACTIVATED VVER-1200 REACTOR STRUCTURES

Abstract. The results of calculation studies of the amount of solid high-level, intermediate-level, low-level, very low-level radioactive waste (HLW, ILW, LLW, VLLW, respectively) generated during neutron activation of structural materials adjacent to the core of the VVER-1200 reactor plant, depending on the time after the final stopping it. An assessment of the volumes of radioactive waste (RAW) of activation origin generated over 60 years of operation of a VVER-1200 type reactor was carried out on the basis of computational studies of the induced activity of structural and protective materials using reactor and Monte Carlo program codes (SERPENT 2, TVS-M, DYN3D, MCU-PD). Specific activities for each isotope, total specific activities and activities, masses and volumes of activated structural and protective reactor materials for various categories of radioactive waste were calculated after the specified period of operation of VVER-1200 and over time after the final shutdown of the reactor. The obtained dependences of changes in the masses and volumes of activated materials over time after the final shutdown of the reactor make it possible to determine these parameters of materials separately for each category of radioactive waste and in total at any point in time. Thus, the masses of activated materials related to radioactive waste will decrease by 264 tons (from 713 to 449 tons) over 200 years of aging, and the volumes will decrease by 74.3 m³ (from 169 to 94.7 m³). Forecast quantitative data on the volumes and mass of activated reactor structures, depending on the duration of their exposure after the final shutdown of the power unit, will make it possible to develop technical proposals, forecast plans and schedules for organizing a radioactive waste management system during the decommissioning of the VVER-1200 reactor plant, as well as possible technological and design solutions for the disposal system for these radioactive waste.

Key words: radioactive waste from nuclear power plants, solid radioactive waste, category of solid radioactive waste, VVER-1200, program codes

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Mikhail L. Zhemzhurov* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Laboratory of Radiation Safety of Nuclear Facilities at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: jema@sosny.bas-net.by; *Georgy M. Zhmura** – Senior Researcher of the Laboratory of Radiation and Chemical Research of the Environment at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: georgiyzhmura@mail.ru; *Isaak E. Rubin* – Senior Researcher at the Laboratory of Neutron Physics at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: rubin@sosny.bas-net.by; *Nina M. Dneprovskaya* – Researcher of the Laboratory of Neutron Physics at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: dneprnina@mail.ru; *Natalia A. Tetereva* – Researcher of the Laboratory of Neutron Physics at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: tetna@mail.ru; *Ivanton V. Rudenkov* – Junior Researcher of the Laboratory of Modeling of Supercomputer Technologies in Nuclear Physics and Power Engineering at Joint

Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: godder@tut.by; Leonid F. Babichev – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Laboratory for Modeling Supercomputer Technologies in Nuclear Physics and Power Engineering at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: babichev@sosny.bas-net.by

Contribution of the authors: Mikhail L. Zhemzhurov – justification of the research concept, setting research goals from the tasks, formulating conclusions and interpreting the results, editing; Georgy M. Zhmura – development of research methodology, carrying out calculations, writing the text of the manuscript, formulating conclusions and interpreting the results; Isaak E. Rubin – development of research methodology, calculations and interpretation of results; Nina M. Dneprovskaya – carrying out calculations; Natalia A. Teterova – carrying out calculations; Ivanton V. Rudenkov – development of research methodology, carrying out calculations; Leonid F. Babichev – development of research methodology, carrying out calculations.

For citation: Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Teterova N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F. Determination of volume of radioactive waste in activated VVER-1200 reactor structures. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 39–52 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-39-52>

Received: 10.07.2023

Modified version: 08.01.2024

Approved for publication: 22.02.2024

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. В соответствии с рекомендациями МАГАТЭ¹ и требованиями, содержащимися в национальных нормативных правовых документах², процесс вывода блоков атомных электростанций (АЭС) из эксплуатации должен учитываться, начиная уже со стадии проектирования станции. Для этого уже на данной стадии необходима оценка объема и радиационных характеристик отходов, которые будут образовываться при выводе из эксплуатации энергоблока.

В частности, проработка вопросов создания системы захоронения радиоактивных отходов (РАО), образуемых в результате эксплуатации и вывода из эксплуатации Белорусской АЭС, входит в число основных задач Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции³.

Согласно нормам и правилам по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения»⁴, в Беларуси для обеспечения долгосрочной безопасности при захоронении твердые РАО (ТРО) подразделяются на четыре класса. Они аналогичны классам 1–4 по российской классификации, изложенной в документе «О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов»⁵. Указанная классификация устанавливает прямую связь категории твердых РАО с вариантом их захоронения. Так, высокоактивные (ВАО) и долгоживущие среднеактивные (ДСАО) РАО классов 1, 2 должны быть изолированы в пунктах глубинного захоронения, а очень низкоактивные (ОНРАО), низкоактивные (НАО) и короткоживущие среднеактивные (КСАО) РАО классов 3, 4 – в пунктах приповерхностного захоронения.

¹ Вывод из эксплуатации установок. Общие требования безопасности, ч. 6 (№ GSR part 6) / IAEA (Международное агентство по атомной энергетике). Вена, 2015. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1652r_web.pdf (дата обращения: 05.01.2024).

² Закон Республики Беларусь «О регулировании безопасности при использовании атомной энергии» от 10 октября 2022 года № 208-З и Закон Республики Беларусь «О радиационной безопасности» от 18 июня 2019 года № 198-З.

³ Об утверждении Стратегии обращения с радиоактивными отходами Белорусской атомной электростанции: постановление Совета Министров Респ. Беларусь, 2 июня 2015 г., № 460 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь. URL: <https://pravo.by/natsionalnyu-reestr/poisk-v-reestre/?p1=5/40619> (дата обращения: 05.06.2023).

⁴ Нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения»: утв. постановлением МЧС Респ. Беларусь от 28.09.2010 № 47 (в ред. постановления МЧС Респ. Беларусь от 24.07.2017 № 33). URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a98/postanovlenie_mchs_47.pdf (дата обращения: 26.06.2023).

⁵ О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов: утв. постановлением Правительства Рос. Федерации от 19.10.2012 № 1069 (в ред. постановления Правительства Рос. Федерации от 04.02.2015 № 95) // Электронный фонд нормативно-технической и нормативно-правовой информации Консорциума «Кодекс». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902376375> (дата обращения: 26.06.2023).

При демонтаже реакторного и технологического оборудования в ходе вывода АЭС из эксплуатации образуются РАО, полученные двумя путями: 1) за счет нейтронной активации конструкционных и защитных материалов реактора и 2) в ходе накопления радионуклидов в технологическом оборудовании за срок службы АЭС. Основную массу при эксплуатации реактора типа ВВЭР-1200 будут составлять РАО, образующиеся первым путем.

Для разработки технических предложений, прогнозных планов-графиков по организации системы обращения с РАО в процессе вывода из эксплуатации АЭС с реакторной установкой ВВЭР-1200, а также возможных технологических и конструктивных решений по системе захоронения этих РАО необходимо иметь прогнозные количественные данные по объемам и массе активированных реакторных конструкций в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока. Расчетное прогнозирование объемов радиоактивных отходов, образующихся в результате нейтронной активации бетонов радиационной защиты за срок эксплуатации реактора типа ВВЭР, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова реактора рассмотрено в [1–3]. Данные по активности конструкций реакторной установки в зависимости от времени после ее останова представлены в материалах проекта Белорусской АЭС и частично опубликованы в [1, 4]. В [1] выполнено расчетное моделирование активации элементов конструкций реактора при эксплуатации АЭС с ВВЭР-1200, при этом в соответствии с российскими санитарными правилами обращения с РАО⁶ все конструкции реактора были разделены на три группы твердых РАО (высоко-, средне- и низкоактивные). Однако в настоящее время проектные и литературные данные по объемам всех активированных РАО раздельно по категориям в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова реактора ВВЭР-1200 отсутствуют.

Цель настоящего исследования – получение прогнозных количественных данных по объемам и массе активированных реакторных конструкций, относящихся по уровню удельной активности к РАО различных категорий, в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока реактора типа ВВЭР-1200.

Методика исследований. В [5–7] авторами настоящей публикации представлены результаты оценки объемов и радиационных характеристик твердых ВАО и ДСАО на момент останова реактора типа ВВЭР-1200 Белорусской АЭС. Расчеты производились с целью разработки технической концепции системы глубинного захоронения этих групп РАО. В указанных работах расчеты наведенной активности конструкционных и защитных материалов выполнялись для срока эксплуатации реактора 60 лет с использованием кодов Монте-Карло (основанных на использовании генератора случайных величин и вычислении вероятностных характеристик нейтронно-физических процессов) и других реакторных программных кодов:

SERPENT 2 – трехмерный код на основе метода Монте-Карло, предназначенный для определения нейтронно-физических характеристик систем, которые содержат ядерные делящиеся материалы (VTT Technical Research Centre of Finland, лицензия № L1K002/JIPNRMINSK);

MCU-PD – компьютерная программа для численного моделирования процессов переноса различного вида излучений (нейтронов, гамма-квантов, электронов, позитронов) в трехмерных системах методом Монте-Карло (аттестационный паспорт от 24.10.2018 № 456);

TBC-M – программа для расчета нейтронно-физических характеристик и малогрупповых констант различных типов топливных кассет ВВЭР для программы DYN3D (аттестационный паспорт от 21.02.2002 № 135);

DYN3D – программа для расчета установившихся и переходных процессов в ядерных реакторах различных типов (лицензионное соглашение № 0012011 между Центром имени Гельмгольца Дрезден-Росендорф и Объединенным институтом энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси).

⁶ Санитарные правила и гигиенические нормативы СанПин 2.6.1.24-03 «Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций (СП АС-03)»: утв. Гл. гос. санитарным врачом РФ 22 апр. 2003 г. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294814/4294814649.htm> (дата обращения: 05.01.2024).

Оценки объемов твердых ВАО и ДСАО, образующихся при нейтронной активации материалов конструкций ВВЭР-1200 Белорусской АЭС и необходимых для принятия технологических и конструктивных решений по системе глубинного захоронения этих РАО, в зависимости от времени после окончательного останова реактора представлены в [8]. Прогнозные данные по активностям РАО в зависимости от времени выдержки были определены исходя из полученных ранее с использованием реакторных и Монте-Карло программных кодов данных по наведенной активности материалов после 60 лет эксплуатации реактора на момент окончательного останова путем расчетов радиоактивного распада каждого изотопа на конкретный момент времени, определения суммарных удельных активностей бета-излучающих радионуклидов и сопоставления их с граничными значениями отнесения к той или иной категории РАО [7].

В настоящей работе с использованием тех же расчетных методик определены объемы каждой категории радиоактивных отходов (высокоактивные, среднеактивные, низкоактивные, очень низкоактивные (ОНАО)) в активированных реакторных конструкциях на момент окончательного останова после 60 лет эксплуатации энергоблоков АЭС и их изменения в процессе выдержки.

Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реакторной установки ВВЭР-1200, рассматриваемых в расчетах, приведены в табл. 1. Расчетная геометрия конструкции реактора представлена 38 участками (каждый элемент конструкции может состоять из нескольких участков в соответствии со схемой расположения активизируемых конструкций). Схемы расположения активизируемых конструкций и материалов в районе активной зоны ВВЭР-1200 в радиальном и аксиальном направлениях представлены в [7].

Таблица 1. Характеристики наиболее облучаемых элементов конструкции реактора типа ВВЭР-1200 [8]

Table 1. Characteristics of the most irradiated structural elements of the VVER-1200 reactor [8]

Элемент конструкции	Номер участка, <i>j</i>	Материал	Плотность, т/м ³	Активируемая масса, т	Объем, м ³	
Выгородка	3	08X18H10T-Y	7,9	41,5	5,26	
Шахта	15	08X18H10T-Y	7,9	24,1	3,05	
	31			13,7	1,74	
Плита нижняя БЗТ высотой 34,7 см (без ПЭЛ)	9	08X18H10T-Y	7,9	14,6	1,84	
ПЭЛ в плите нижней высотой 34,7 см		42XHM + Dy ₂ TiO ₅	5,65	0,20	0,04	
БЗТ без плит и ПЭЛ (слой высотой 20 см)	10–14	08X18H10T-Y	7,9	1,51	0,19	
ПЭЛ (B ₄ C, каждый слой 20 см высотой)		42XHM + B ₄ C	3,25	0,081	0,025	
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) в зоне концевиков твэлов, слой высотой 13,7 см	1	42XHM + Dy ₂ TiO ₅	5,65	0,09	0,016	
ПЭЛ (Dy ₂ TiO ₅) в зоне направляющих каналов, слой высотой 5 см	2			0,034	0,006	
Поглотитель ПЭЛ Dy ₂ TiO ₅	29	Dy ₂ TiO ₅	4,9	0,0079	0,0016	
Оболочка ПЭЛ	30	42XHM	7,9	0,0042	0,0005	
Пространство под активной зоной (каждый слой высотой 20 см)	4–8	08X18H10T-Y	7,9	1,52	0,19	
Внутрикорпусная наплавка	16	08X18H10T + Nb	7,9	3,97	0,50	
	32			2,27	0,29	
Корпус (без наплавки)	17	15XHMФА	7,9	91,4	11,57	
	33			52,3	6,62	
Теплоизоляция	Нижняя часть	09Г2С + 08X18H10Т	1,09	2,22	2,04	
	Основная часть			18	7,38	6,78
	Верхняя часть			19	1,44	1,32

Окончание табл. 1

Элемент конструкции		Номер участка, j	Материал	Плотность, t/m^3	Активируемая масса, т	Объем, m^3
Сухая защита	Левая нижняя часть	35	Серпентинитовый бетон + сталь 3	3,45	14,1	4,09
	Левая основная часть	20			47,0	13,6
	Левая верхняя часть	21			9,18	2,66
	Правая нижняя часть	36			24,1	7,0
	Правая основная часть	22			80,4	23,3
Опорная ферма	Нижняя часть	25	Серпентинитовый бетон + сталь 3	5,64	58,7	10,4
	Правая верхняя часть	26			58,7	10,4
	Левая верхняя часть	27			41,7	7,4
Биологическая защита		28	Серпентинитовый бетон + бор	2,78	19,6	7,05
Строительный бетон за сухой защитой	Левая нижняя часть	37	Строительный бетон с добавкой бора	2,2	9,6	4,3
	Левая основная часть	23			31,8	14,5
	Правая нижняя часть	38			10,1	4,6
	Правая основная часть	24			33,7	15,3

Результаты и их обсуждение. Согласно данным расчетных исследований по кодам SERPENT 2 и MCU изотопного состава и активностей радионуклидов на момент окончательного останова реактора активируемых конструкционных и защитных материалов реакторной установки ВВЭР-1200, были рассчитаны удельные активности по каждому изотопу, суммарные удельные активности и активности, массы и объемы активированных материалов с течением времени для всех элементов конструкций. Ввиду ограничений по объему представляемых материалов, в данной работе представлены только расчеты для шахты (табл. 2) и сухой защиты (табл. 3).

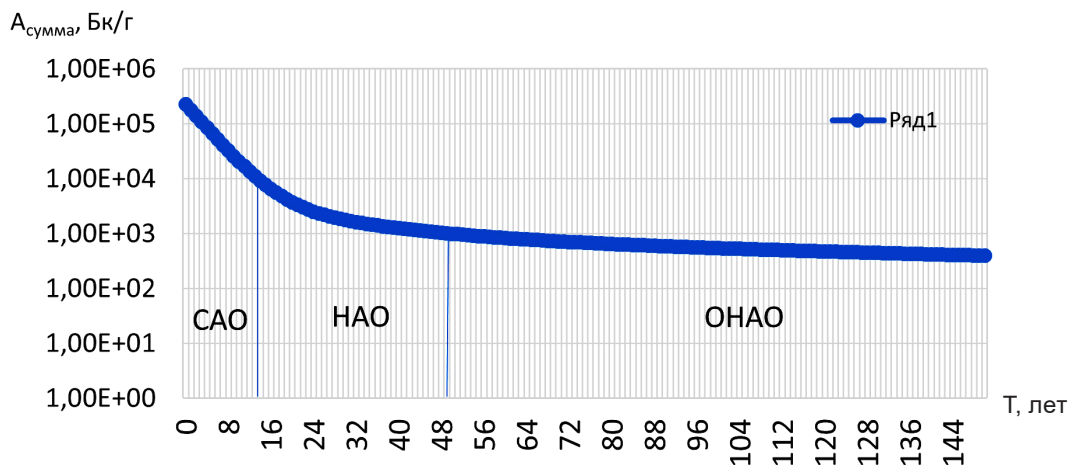
Красным, желтым, синим и голубым цветами в табл. 2 и 3 выделены радиоактивные отходы, содержащие бета-излучающие радионуклиды (за исключением трития) и относящиеся соответственно к радиоактивным отходам следующих типов: высокоактивные (ВАО – более 10^7 Бк/г), среднеактивные (САО – от 10^4 до 10^7 Бк/г), низкоактивные (НАО – от 10^3 до 10^4 Бк/г) и очень низкоактивные (ОНАО – до 10^3 Бк/г).

По тритию материалы нормируются отдельно. В соответствии с табл. 3 приложения 4 к гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного взаимодействия»⁷ и табл. 1 из приложения 2 СПОРО-2015⁸, к ОНАО относятся материалы, содержащие тритий от 10^2 до 10^7 Бк/г. В табл. 3 материалы сухой защиты, относящиеся к ОНАО по тритию, выделены оранжевым цветом.

На рисунке представлен график зависимости суммарных удельных активностей бета-излучающих радионуклидов (за исключением трития) в материалах сухой защиты реакторной установки ВВЭР-1200 с течением времени после окончательного останова АЭС. Из графика с точностью до года можно определить переход из одной категории РАО в другую. Время перехода из одной категории РАО в другую определялось исходя из того, будет ли величина суммарной удельной активности бета-излучающих радионуклидов (за исключением трития) в материалах

⁷ Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к радиационной безопасности» и Гигиенического норматива «Критерии оценки радиационного воздействия»: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 28.12.2012 № 213 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 25.05.2013, 8/26850. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21326850p> (дата обращения: 05.01.2024).

⁸ Об утверждении Санитарных норм и правил «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами» и признании утратившими силу постановлений Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь от 7 апреля 2005 г. № 45, Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28 марта 2014 г. № 21: постановление М-ва здравоохранения Респ. Беларусь от 31.12.2015 № 142 // Национальный правовой Интернет-портал Республики Беларусь, 05.03.2016, 8/30613. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=W21630613p> (дата обращения: 05.01.2024).



Зависимость суммарной удельной бета-активности активированных материалов сухой защиты от времени выдержки после окончательного останова реакторной установки ВВЭР-1200

Dependence of the total specific beta activity of activated dry shielding materials on the holding time after the final shutdown of the VVER-1200 reactor plant

находиться в интервалах отнесения к CAO, HAO и OHAO. Такие графики сделаны для всех элементов конструкций, но ввиду ограничений по объему представляемых материалов в этой работе даны только для сухой защиты.

Для некоторых элементов конструкций из графиков можно с точностью до года определить и переход из категории OHAO в нерадиоактивные отходы. Время данного перехода определялось исходя из того, будет ли сумма отношений удельных активностей бета-излучающих радионуклидов (за исключением трития) в материалах к соответствующим уровням изъятия для больших количеств материалов и освобождения от контроля, приведенных в табл. 3 приложения 4 к гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного взаимодействия», удовлетворять критерию

$$\sum_i \left(\frac{A_i}{УИ_i} \right) \leq 1,$$

где A_i – удельная активность i -го радионуклида; $УИ_i$ – уровень изъятия i -го радионуклида.

Из расчетов следует, что:

материалы выгородки, шахты, пространства под активной зоной, ПЭЛ (Du_2TiO_5) со сроком службы 10 лет, ПЭЛ (Du_2TiO_5) со сроком службы 3 года будут относиться к категории ВАО с момента останова реактора до 200 лет включительно;

материалы ПЭЛ (B_4C) со сроком службы 10 лет будут HAO в течение 200 лет;

после 2 лет выдержки материалы наплавки перейдут из категории ВАО в CAO, после 88 лет выдержки материалы наплавки перейдут из категории CAO в HAO, а после 36 лет выдержки материалы теплозащиты перейдут из категории CAO в HAO;

после 2 лет выдержки материалы БЗТ перейдут из категории ВАО в CAO, после 13 лет выдержки материалы сухой защиты перейдут из категории CAO в HAO, а после 49 лет выдержки – из категории HAO в OHAO (см. рисунок);

уже через 1 год выдержки материалы опорной фермы перейдут из категории HAO в OHAO, а через 139 лет выдержки – из OHAO в нерадиоактивные отходы;

после 44 лет выдержки материалы биологической защиты перейдут из категории OHAO в нерадиоактивные отходы и после 78 лет выдержки материалы строительного бетона перейдут из категории OHAO в нерадиоактивные отходы.

Таблица 5. Суммарные массы и объемы активированных материалов по всем элементам конструкций реактора ВВЭР-1200 по категориям РАО в зависимости от времени после останова реактора

Table 5. Total masses and volumes of activated materials for all structural elements of the VVER-1200 reactor by RW categories depending on the time after the reactor shutdown

Категория РАО	Время, лет											
	0	1	5	10	20	30	50	70	90	100	150	200
BAO	Масса, г	1,17E+08	1,17E+08	8,91E+07	8,91E+07	8,91E+07	8,91E+07	8,91E+07	8,91E+07	8,91E+07	8,91E+07	8,91E+07
	Объем, м ³	1,50E+01	1,50E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01	1,14E+01
CAO	Масса, г	3,30E+08	3,30E+08	3,58E+08	3,58E+08	1,83E+08	1,72E+08	1,72E+08	2,84E+07	2,84E+07	2,84E+07	2,84E+07
	Объем, м ³	7,90E+01	7,90E+01	8,26E+01	8,26E+01	3,19E+01	3,19E+01	2,18E+01	3,59E+00	3,59E+00	3,59E+00	3,59E+00
HAO	Масса, г	1,62E+08	2,43E+06	2,43E+06	2,43E+06	1,77E+08	1,77E+08	1,35E+07	1,35E+07	1,57E+08	1,57E+08	1,57E+08
	Объем, м ³	2,90E+01	7,48E-01	7,48E-01	7,48E-01	5,14E+01	5,14E+01	1,09E+01	1,09E+01	2,91E+01	2,91E+01	2,91E+01
OHAO	Масса, г	1,05E+08	2,64E+08	2,64E+08	2,64E+08	2,64E+08	2,64E+08	4,19E+08	4,19E+08	3,34E+08	1,75E+08	1,75E+08
	Объем, м ³	4,58E+01	7,40E+01	7,40E+01	7,40E+01	7,40E+01	7,40E+01	1,18E+02	1,18E+02	7,89E+01	5,07E+01	5,07E+01
Сумма по всем РАО	Масса, г	7,13E+08	7,13E+08	7,13E+08	7,13E+08	7,13E+08	7,13E+08	6,94E+08	6,94E+08	6,09E+08	4,49E+08	4,49E+08
	Объем, м ³	1,69E+02	1,69E+02	1,69E+02	1,69E+02	1,69E+02	1,69E+02	1,62E+02	1,23E+02	1,23E+02	9,47E+01	9,47E+01

Материалы сухой защиты в период 0–13 лет будут сначала САО, в период 14–49 лет – НАО, а в период 50–200 лет – ОНАО по бета-излучающим радионуклидам (см. табл. 3). При этом в период 0–70 лет будут относиться к ОНАО по тритию, то есть в период 50–70 лет материалы сухой защиты будут ОНАО по бета-излучающим радионуклидам и по тритию одновременно.

Из расчетов следует, что материалы опорной фермы до года будут НАО, а в период 1–139 лет – ОНАО по бета-излучающим радионуклидам. При этом материалы опорной фермы в период 0–20 лет будут относиться к ОНАО по тритию, то есть в период 1–20 лет материалы опорной фермы будут ОНАО по бета-излучающим радионуклидам и по тритию одновременно.

В табл. 4 представлены массы и объемы активированных материалов по каждому элементу конструкции реакторной установки ВВЭР-1200 по категориям РАО в зависимости от времени после ее останова.

Суммарные массы и объемы активированных материалов по всем элементам конструкций ВВЭР-1200 по категориям РАО в зависимости от времени после останова реактора приведены в табл. 5.

Из табл. 5 видно, что масса ВАО первые несколько лет будет постоянной (117 т), затем она снизится на 24 % и будет постоянной до 200 лет включительно. Через несколько лет после останова реактора суммарная масса САО возрастет на 8 %, затем будет уменьшаться, а после 90 лет выдержки станет постоянной. Что касается массы НАО, то на момент останова основной вклад будет давать опорная ферма, но уже через год ее материалы перейдут в ОНАО и масса НАО снизится на два порядка. В период 20–30 лет вклад в НАО даст сухая защита, которая в этот период перейдет из САО в НАО. Но после 50 лет выдержки материалы сухой защиты перейдут в ОНАО, зато в НАО в это время перейдут материалы теплоизоляции и около 90 лет корпус без наплавки. Масса ОНАО с течением времени будет расти от 105 т до максимума в 445 т (период 50–70 лет) и затем будет уменьшаться.

Зависимости величин объемов материалов от времени, представленных в табл. 4, 5, носят такой же характер, как и для масс материалов.

Массу и объем короткоживущих САО можно определить, как разницу масс и объемов САО и ДСАО. Так, масса короткоживущих САО на момент останова составит 175 т, а объем 49,8 м³.

Заключение. На основе данных расчетных исследований по кодам SERPENT 2 и MCU изотопного состава и активности по каждому элементу активируемых конструкционных и защитных материалов на момент останова реакторной установки ВВЭР-1200 были рассчитаны удельные активности по каждому изотопу, суммарные удельные активности и активности, массы и объемы активированных материалов различных категорий РАО с течением времени после окончательного останова реактора.

Полученные зависимости изменений масс и объемов активированных материалов с течением времени после окончательного останова реактора позволяют определить массы и объемы материалов каждой категории РАО отдельно и в сумме на любой момент времени. Так, из анализа зависимостей следует, что массы активированных материалов, относящиеся к РАО, за 200 лет выдержки уменьшатся на 264 т (от 713 до 449 т), а объемы материалов, относящиеся к РАО, – на 74,3 м³ (от 169 до 94,7 м³).

Прогнозные количественные данные по объемам и массе активированных реакторных конструкций в зависимости от длительности их выдержки после окончательного останова энергоблока позволят разработать технические предложения, прогнозные планы-графики по организации системы обращения с РАО в процессе вывода из эксплуатации АЭС, а также возможные технологические и конструктивные решения по системе захоронения этих РАО.

Список использованных источников

1. Радиационные характеристики реакторных конструкций после окончательного останова АЭС с ВВЭР / Б. К. Былкин [и др.] // Атом. энергия. – 2009. – Т. 106, вып. 1. – С. 56–60.
2. К определению категории РАО для бетонов радиационной защиты ядерных установок при их выводе из эксплуатации / Б. К. Былкин [и др.] // Атом. энергия. – 2016. – Т. 121, вып. 5. – С. 298–301.
3. Наведенная активность радиационной защиты в проблеме вывода из эксплуатации ядерных установок / Б. К. Былкин [и др.] // Ядер. и радиац. безопасность. – 2017. – № 3 (85). – С. 1–14.
4. Практические основы разработки и обоснования технических характеристик и безопасности эксплуатации реакторных установок типа ВВЭР. – М.: НИЦ «Курчатовский институт», 2015. – 480 с.
5. Оценка объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов, образующихся в результате активации конструкционных и защитных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // VIII Международная конференция «Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века»: доклады, Минск, 23–26 окт. 2020 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; отв. за вып. А.В. Радкевич. – Минск: Право и экономика, 2020. – С. 11–21.
6. Расчетные исследования образования высокоактивных и долгоживущих среднеактивных радиоактивных отходов активационного происхождения для реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // Нелинейная динамика и приложения: труды XXVII Междунар. семинара, Минск, 19–22 мая 2020 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед. – Сосны; под ред. В. И. Кувшинова, В. А. Шапорова. – Минск: А. Н. Вараксин, 2020. – С. 66–75.
7. Оценка объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов, образующихся в результате активации конструкционных материалов реактора ВВЭР-1200 Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2021. – Т. 66, № 3. – С. 365–377. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-365-377>
8. Прогнозная оценка изменения объемов подлежащих глубинному захоронению радиоактивных отходов в активированных реакторных конструкциях в процессе их выдержки после окончательного останова энергоблоков Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 3. – С. 332–344. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-332-344>

References

1. Bylkin B. K., Yegorov A. L., Zhurbenko Ye. A., Tsofin V. I. Radiation characteristics of reactor structures after the final shutdown of a nuclear power plant with VVER. *Atomic Energy*, 2009, vol. 106, pp. 73–78. <https://doi.org/10.1007/s10512-009-9133-2>
2. Bylkin B. K., Engovatov I. A., Kozhevnikov A. N., Sinyushin D. K. Radioactivity Category Determination for Radiation-Protection Concrete in Nuclear Facilities Undergoing Decommissioning. *Atomic Energy*, 2017, vol. 121, pp. 383–387. <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0216-1>
3. Bylkin B. K., Kozhevnikov A. N., Engovatov I. A., Sinyushin D. K. Induced activity of radiation shielding before NPP decommissioning. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety Journal*, 2017, no. 3 (85), pp. 1–14 (in Russian).
4. *Practical Foundations for the Development and Substantiation of Technical Characteristics and Operational Safety of VVER-type Reactor Plants*. Moscow, National Research Center “Kurchatov Institute”, 2015. 480 p. (in Russian).
5. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryany G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F., Griбанова K. A., Kovalevich V. G. Estimation of the volumes of radioactive waste subject to deep burial, generated as a result of activation of structural and protective materials of the VVER-1200 reactor of the Belarusian NPP. *VIII Mezhdunarodnaya konferentsiya “Atomnaya energetika, yadernye i radiatsionnye tekhnologii XXI veka”: doklady, Minsk, 23–26 oktyabrya 2020 g.* [VIII International Conference “Nuclear Energy, Nuclear and Radiation Technologies of the 21st century”: Reports, Minsk, October 23–26, 2020]. Minsk, Pravo i ekonomika Publ., 2020, pp. 11–21 (in Russian).
6. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Serebryany G. Z., Rubin I. E., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F., Yrashevich K. A., Kovalevich V. G. Calculation researches for the formation of high-level and long-life medium-level radioactive waste of activation origin for the VVER-1200 reactor of Belarusian NPP. *Nelineinaya dinamika i prilozheniya: trudy XXVII Mezhdunarodnogo seminar, Minsk, 19–22 maya 2020 g.* [Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the XXVII International Seminar, Minsk, May 19–22, 2020]. Minsk, A. N. Varaksin Publ., 2020, pp. 66–75 (in Russian).
7. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Serebryany G. Z., Dneprovskaya N. M., Tetereva N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F. Calculation researches for the formation of high-level and long-life medium-level radioactive waste of activation origin for the WVER-1200 reactor of Belarusian NPP. *Vestsi Natsyyanal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekh-*

nichnykh navuk = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 365–377 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-365-377>

8. Zhemzhurov M. L., Zhmura G. M., Rubin I. E., Serebryany G. Z., Dneprovskaya N. M., Teterova N. A., Rudenkov I. V., Babichev L. F. Predictive evaluation of changes in the volumes of radioactive waste to be deeply dispositioned in activated reactor structures in the process of their storage after the final shutdown of the Belarusian NPP power units. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh navuk* = *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 3, pp. 332–344 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-3-332-344>

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

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>
UDC 528.88:550.388.2



Original article

Alexander O. Naumov, Petr A. Khmarskiy*, Nikita. I. Byshnev, Mikita A. Piatrouski

*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus,
16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus*

**DETERMINATION OF TOTAL ELECTRON CONTENT IN THE IONOSPHERE
OVER THE TERRITORY OF THE REPUBLIC OF BELARUS BASED ON GLOBAL
NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS DATA**

Abstract. We present the results of experimental studies of electron content in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus based on data from global navigation satellite systems. The results of measurements of the precise positioning system of the Republic of Belarus and navigation data of GPS satellites in RINEX format were used as input data. Expressions for calculation of the total electron content using the two-frequency method and a combination of measurements by phase and code delays are given. Algorithms for eliminating cycle slip and determining differential code biases are used. Examples of calculating the vertical electron content over the Republic of Belarus at different moments of time are demonstrated. The obtained results are reasonable to use in monitoring of the ionosphere in order to provide reliable operation of radio systems, detection of ionospheric anomalies of natural and artificial origin, as well as forecasting of natural phenomena on their basis.

Key words: ionosphere, radio tomography, total electron content, vertical electron content, global navigation satellite system, navigation signal.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest

Information about the authors: *Alexander O. Naumov* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: naumov@iaph.bas-net.by; *Petr A. Khmarskiy** – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru; *Nikita I. Byshnev* – Junior Researcher at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0009-0002-4208-1788>. E-mail: nick.byshnev@gmail.com; *Mikita A. Piatrouski* – Junior Researcher at Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0009-0007-5926-6339>. E-mail: petrovskij.nico@gmail.com

Contribution of the authors: *Alexander O. Naumov* – substantiation of the research concept, formulation of ideas, research goals and objectives, development of methodology and research model; *Petr A. Khmarskiy* – collection and systematization of data, comparative analysis, writing the text of the manuscript; *Nikita. I. Byshnev* – generalization and interpretation of the results of the study, editing the text of the manuscript, working with graphic material; *Mikita A. Piatrouski* – computer and mathematical modeling.

For citation: Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Byshnev N. I., Piatrouski M. A. Determination of total electron content in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus based on global navigation satellite systems data. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>

Received: 05.07.2023

Approved for publication: 07.09.2023

Signed to the press: 15.03.2024

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Оригинальная статья

А. О. Наумов, П. А. Хмарский*, Н. И. Бышнев, Н. А. Петровский

*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь***ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ
НАД ТЕРРИТОРИЕЙ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ ПО ДАННЫМ ГЛОБАЛЬНЫХ
НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ**

Аннотация. Приводятся результаты экспериментальных исследований концентрации электронов в ионосфере над территорией Республики Беларусь по данным глобальной навигационной спутниковой системы. В качестве входных данных использовались результаты измерений спутниковой системы точного позиционирования Республики Беларусь и навигационные данные высокоорбитальных навигационных спутников в формате RINEX. Приведены выражения для расчета полного электронного содержания при помощи двухчастотного метода и комбинации измерений по фазовым и кодовым задержкам. Решены задачи коррекции проскальзывания цикла навигационного сигнала и определения дифференциальных кодовых задержек. Продемонстрированы примеры вычисления вертикального электронного содержания над Республикой Беларусь в разные моменты времени. Полученные результаты целесообразно использовать при мониторинге ионосферы с целью обеспечения надежной работы радиосистем, обнаружения ионосферных аномалий естественного и искусственного происхождения, а также прогнозирования природных явлений на их основе.

Ключевые слова: ионосфера, радиотомография, полное электронное содержание, вертикальное электронное содержание, глобальная спутниковая навигационная система, навигационный сигнал

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Наумов Александр Олегович* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: naumov@iaph.bas-net.by; *Хмарский Петр Александрович** – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pietge2009@mail.ru; *Бышнев Никита Игоревич* – младший научный сотрудник Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0002-4208-1788>. E-mail: nick.byshnev@gmail.com; *Петровский Никита Андреевич* – младший научный сотрудник Института прикладной физики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0007-5926-6339>. E-mail: petrovskij.nico@gmail.com

Вклад авторов: *Наумов Александр Олегович* – обоснование концепции исследования, формулирование идеи, исследовательских целей и задач, разработка методологии и модели исследования; *Хмарский Петр Александрович* – сбор и систематизация данных, проведение сравнительного анализа, написание текста рукописи; *Бышнев Никита Игоревич* – обобщение и интерпретация результатов исследования, работа с графическими материалами; *Петровский Никита Андреевич* – компьютерное и математическое моделирование.

Для цитирования: Определение концентрации электронов в ионосфере над территорией Республики Беларусь по данным глобальных навигационных спутниковых систем / А. О. Наумов [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 53–64. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-53-64>

Поступила в редакцию: 05.07.2023

Утверждена к публикации: 07.09.2023

Подписана в печать: 15.03.2024

Introduction. An important parameter, which is used in various fields of practical activities, is the concentration of electrons in the ionosphere. As is known, the ionosphere contains ions and free electrons, which scatter radio waves and can affect the transmission of radio signals. The propagation of radio waves through the ionosphere is difficult depending on the concentration of electrons and leads to distortions of the radio signal passing through it [1, 2]. Consideration of this information is extremely important for satellite radio navigation, radio communications (especially for long distances), radar systems, etc. Thus, the assessment of electron concentration in the ionosphere allows prediction and understanding the state of the ionosphere and improvement of the performance of communication, location and navigation systems. In addition, estimation of distribution of electron concentration in the ionosphere is important for studies of radio wave propagation in the atmosphere, climate, natural hazards, etc. [1, 3–5]. All these areas are related to forecasting and modeling of ionosphere state and its disturbances, and therefore require reliable data on distribution of electron concentration.

One of the most effective means of studying the ionosphere in recent times is radio-tomography. It allows with the help of satellite transmitting and ground receiving station probing the ionosphere in a wide spatial and temporal range and applying tomographic methods to reconstruct the distribution of electron concentration. Such a radio tomographic system includes a group of satellites moving on

circular or elliptical orbits, and a system of ground receiving stations (Figure 1). The important advantage of the method of radio-tomography is that it allows obtaining information about changes in the distribution of electron concentration in the ionosphere in real time, which in turn makes it possible to ensure the stability of technology and communication systems that depend on the ionosphere.

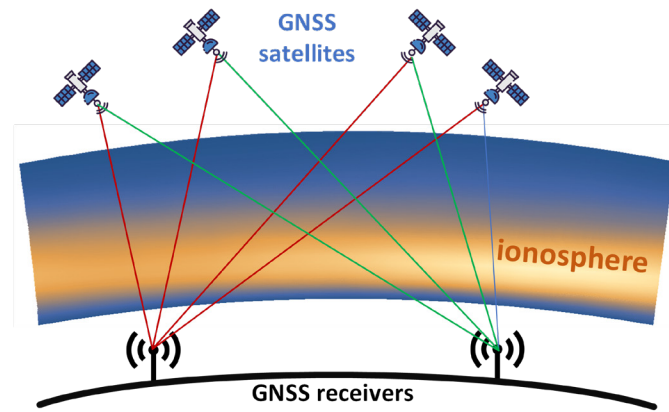


Figure 1. Principle of ionospheric tomography based on data from global navigation satellite systems

Design and development of global satellite navigation systems (GNSS) has opened new opportunities for research of ionosphere. Among the centers involved in these studies should be distinguished [6–15]: National Center for Atmospheric Research (Boulder, USA); Space Radio-Diagnostic Research Center, University of Warmia and Mazury (Olsztyn, Poland); Institute for Space-Earth Environmental Research (Japan); Max Planck Institute for Solar System Research; Institute of Space Science (Malaysia); Ionosphere Research Unit, Belgian Institute for Space Aeronomy (Belgium); Department of Physics of the Earth, Astronomy and Astrophysics I (Geophysics and Meteorology), Complutense University of Madrid (Spain); Abdus Salam International Center for Theoretical Physics (Italy) and others.

This work is the first in a planned series of articles devoted to the development and research of algorithms and software for radiometric three-dimensional monitoring of distribution of electron concentration in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus. The purpose of this paper is to develop a method for determining the total electron content (TEC) in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus from data of global navigation satellite systems.

Generalized structural scheme of calculating the electron content in the ionosphere. The process for determining the electron content in the ionosphere based on GNSS is complicated by interference and distortions associated with the reception, transmission and features of the environment of satellite signals [3]. The key problems include [1, 2]: satellite signal cycle slip, phase ambiguity and the presence of differential code biases. All of these factors lead to noise, distortion, and bias of the estimates relative to the true value of the electron content. Thus, correction methods are needed to improve the quality of GNSS-based estimates of electron content in the ionosphere. Based on the analysis of the literature in this area, as well as research and practical experience of the authors in ionospheric radio tomography and related areas, a structural scheme was developed to solve the problem (Figure 2).

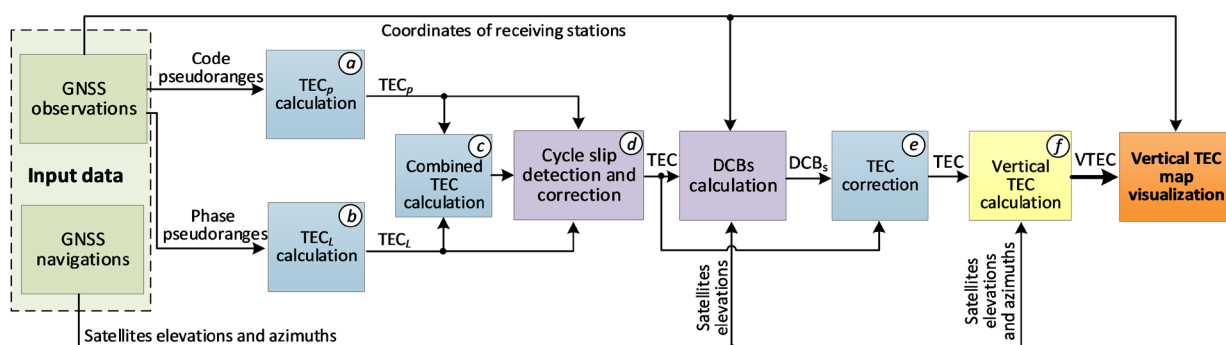


Figure 2. Generalized structural scheme for calculating the total electron content in the ionosphere

The input data for such system are the results of observations of the satellite system of precise positioning of the Republic of Belarus and navigation data of GPS satellite systems [16]. All data are provided in the RINEX format [17], example of which structure is shown in Figure 3.

2.11 OBSERVATION DATA G (GPS)										RINEX VERSION / TYPE	
teqc 2018Dec12 UNAVCO Archive Ops 20190114 09:08:42UTCPOW / RUN BY / DATE											
Solaris x86 5.10 AMD64 cc SCS.8 -xarch=amd64 *+ =										COMMENT	
BIT 2 OF LLI FLAGS DATA COLLECTED UNDER A/S CONDITION										COMMENT	
BESI										MARKER NAME	
										MARKER NUMBER	
Bishal Upreti Nepal Academy of Science and Technology										OBSERVER / AGENCY	
5115875035 TRIMBLE NETRS 5.01										REC # / TYPE / VERS	
60125124 TRM41249.00 NONE										ANT # / TYPE	
550834.4762 5597393.3297 2999199.8097										APPROX POSITION XYZ	
0.0000 0.0000 0.0000										ANTENNA: DELTA H/E/N	
1 1										WAVELENGTH FACT L1/2	
7 L1 L2 C1 F2 F1 S1 S2										# / TYPES OF OBSERV	
15.0000										INTERVAL	
19										LEAP SECONDS	
input file: besi201901010000a.tgd										COMMENT	
RINEX file created by UNAVCO GPS Archive.										COMMENT	
For more information contact archive-gps@unavco.org										COMMENT	
Monument ID: 24903										COMMENT	
UNAVCO 4-char name: BESI										COMMENT	
4-char name from Log or data file: BESI										COMMENT	
Monument location: 28.228609 84.379670 738.0										COMMENT	
Visit ID: 115756										COMMENT	
End of DB comments										COMMENT	
SNR is mapped to RINEX snr flag value [0-9]										COMMENT	
L1 & L2: min(max(int(snr_dBHz/6), 0), 9)										COMMENT	
2019 1 1 0 0 0.0000000 GFS										TIME OF FIRST OBS	
										END OF HEADER	

19	1	1	0	0	0.0000000	0	8G02G15G13G20G25G29G05G21		
124177953.623	6	96762047.96444	23630276.953	23630279.621					
40.500		24.800							
110152519.821	8	85833155.57346	20961328.984	20961333.996					
50.100		37.200							
113004405.117	7	88055366.00045	21504014.602	21504019.145					
47.700		33.500							
124395654.568	6	96931557.20443	23671672.141	23671676.449					
40.400		21.300							
126887960.315	7	98873827.90744	24145991.781	24145999.723					
42.200		25.400							
105915984.871	8	82531954.02446	20155142.375	20155146.977					
52.700		41.700							
118442429.182	7	92292977.39845	22538882.836	22538887.848					
46.800		30.000							
124003275.312	6	96625918.36144	23597031.633	23597034.770					
41.800		24.400							

Figure 3. Structure of a file in RINEX format

After processing and transformation of input navigation data from RINEX-files we obtain estimates of phase and code pseudoranges, as well as angular coordinates of satellites. For a given time moment calculation of the total electron content in the ionosphere is reduced to the following stages (examples are shown in Figure 4 and described below in the article in the relevant sections):

calculation of the total electron content on the paths connecting the navigation satellites and ground receiving stations, based on phase (stage *a*) and code pseudoranges (stage *b*);

calculation of the total electron content based on a combination of measurements obtained from phase and coded pseudoranges (stage *c*);

detection of satellite radio signal cycle slip and correction of total electron content (stage *d*);

estimation of satellites and receivers differential code biases and correction of total electron content on their basis (stage *e*);

calculation of the vertical total electron content (stage *f*) and its visualization on the geographical map.

Calculation of total electron content. The principle of radio tomography ionosphere is based on measurements of time delays of radio signals in the atmosphere (troposphere and ionosphere), which depend on several factors [1, 15, 18]: seasonal and daily variations of electron concentration in ionosphere and gas composition in the troposphere; angle of location and azimuth of satellite relative to ground receiving station; latitude and longitude of location. The ionosphere is a dispersing medium in which the degree of delay of radio signals depends on frequency. Gas temperature, concentration of free electrons and plasma density of ionosphere non-linearly depend on height (Figure 5). The principle of ionospheric radio tomography is based on this property. It is important to note that the troposphere is not a dispersing medium, so measurement of delays in it by radio tomography systems is impossible.

Reconstruction of ionosphere is based on the use of projections of the electron concentration, observed by ground-based GNSS receiving stations from different directions during the movement of satellites [19–21]. In this calculation, the input signals are the values of radio signal delays at the locations of GNSS ground receiving stations, while the output signals are the measured projection values equal to

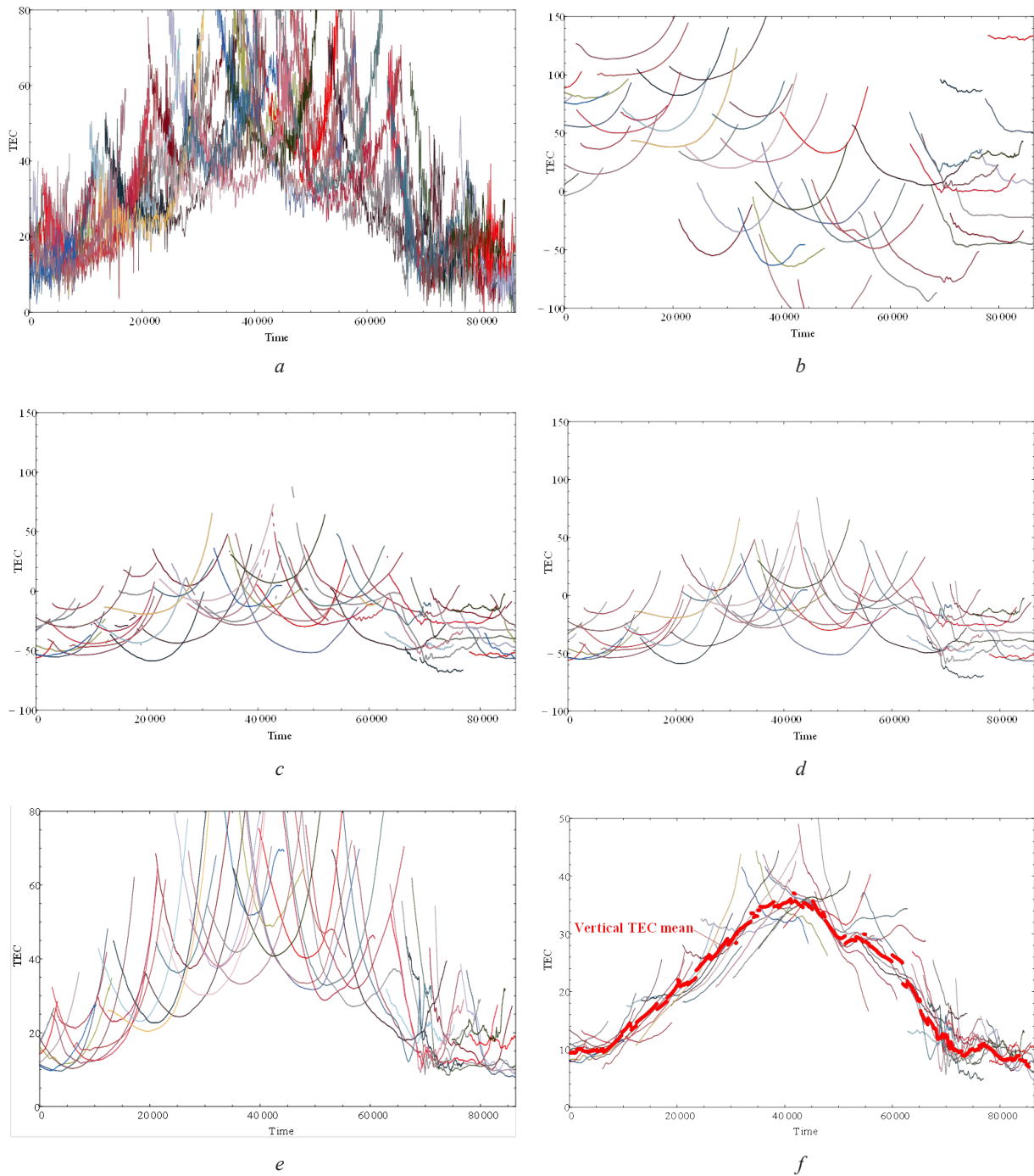


Figure 4. Results of calculations of total electron content by code data of GPS satellites (*a*), phase data of GPS satellites (*b*), after combination code and phase data (*c*); after cycle slip correction (*d*), after correction of differential code biases (*e*) and vertical total electron content (*f*). Observation results are given for one ground station (in the city of Lel'el). Different colors mean 32 different GPS satellites

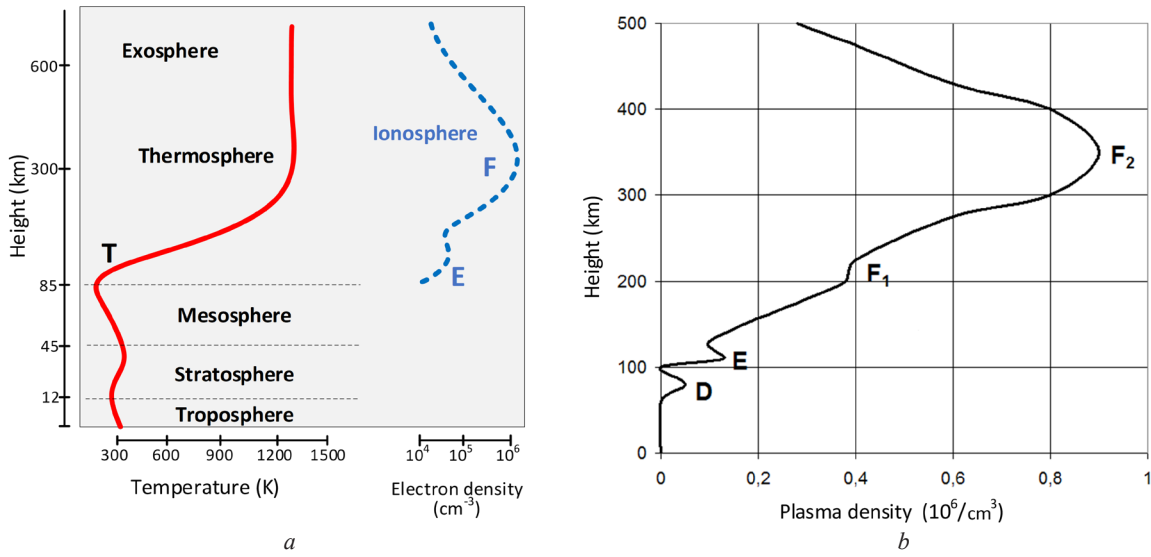


Figure 5. Dependence of ionosphere parameters on height: gas temperature and free electron concentration (a); plasma density (b) on height

the total electron content along the satellite-receiver path. As the satellite moves, there is a sequence of projections at different angles relative to the observation area. The total electron content is defined as the number of electrons in a cylinder with a base area of 1 m², which connects the satellite with the ground receiving station. It is expressed in TEC Units (TECU), where 1 TECU is defined as 10¹⁶ electrons. The total electron content is the linear integral of the electron density along the radio wave propagation path. The lag of the radio signal is related to the integral electron concentration by the formula [1, 15, 18]:

$$d_{\text{ion}} = \frac{A}{f^2} \int_S n_e(S) dS = \frac{A}{f^2} \text{TEC},$$

where d_{ion} – ionospheric delay, m; $A = 40.28$ – constant characterizing refraction of the ionosphere, m³/s²; f – the frequency of the radio signal, Hz; $n_e(S)$ – concentration of electrons along the path S ; $\text{TEC} = \int_S n_e(S) dS$.

Since radio tomography ionosphere is based on measurements of time delay of radio signal, here are the basic relations for these measurements. In the absence of obstacles to radio-wave propagation, the range between the satellite and the ground receiving station is determined by the formula

$$P = (T_r - T_s)c, \quad (1)$$

where T_r is the time of signal reception, s; T_s is the time of signal transmission, s; $c = 3 \cdot 10^8$ – the speed of light in vacuum, m/s.

In satellite radio navigation the range calculated by expression (1) is a pseudorange, as it is calculated without correction for the difference between the satellite clock and the receiver clock [1, 2]. Provided that the radio signal passing through the ionosphere undergoes a delay and at the same time is radiated with wavelengths λ_1 and λ_2 , then the pseudoranges for each of them will be equal [1, 2]:

$$P_1 = P + d_{\text{ion1}} + d_{\text{trop}} + c(\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{s1}); \quad P_2 = P + d_{\text{ion2}} + d_{\text{trop}} + c(\varepsilon_{r2} + \varepsilon_{s2}), \quad (2)$$

where P_1, P_2 – pseudoranges at two wavelengths λ_1 and λ_2 , m; $d_{\text{ion1}}, d_{\text{ion2}}$ – ionospheric delay at corresponding wavelengths λ_1 and λ_2 , m; d_{trop} – tropospheric delay, m; ε_r and ε_s – signal delays in the receiver and satellite equipment, s.

At the same time, it is possible to measure the phase delays of signals and obtain pseudorange values on its basis [1, 2]:

$$\lambda_1\varphi_1 = P + \lambda_1\varphi_{\text{ion1}} + \lambda_1\varphi_{\text{trop1}} - c(\varepsilon_{r1} + \varepsilon_{s1}) + \lambda_1N_1; \lambda_2\varphi_2 = P + \lambda_2\varphi_{\text{ion2}} + \lambda_2\varphi_{\text{trop2}} - c(\varepsilon_{r2} + \varepsilon_{s2}) + \lambda_2N_2, \quad (3)$$

where φ_1 and φ_2 – measured phase values at wavelengths λ_1 and λ_2 ; φ_{ion} – phase shifts due to the ionosphere; φ_{trop} – phase shifts due to the troposphere; N_1 and N_2 are phase ambiguities at two wavelengths λ_1 and λ_2 due to the integer number of wavelengths at the measurement distance.

Using the approximation given by [22]:

$$\varphi_{\text{ion1}} = -d_{\text{ion1}}/\lambda_1, \varphi_{\text{ion2}} = -d_{\text{ion2}}/\lambda_2; \varphi_{\text{trop1}} = -d_{\text{trop1}}/\lambda_1, \varphi_{\text{trop2}} = -d_{\text{trop2}}/\lambda_2. \quad (4)$$

Finally using (1)–(4), we can obtain the pseudoranges:

$$P_4 = P_2 - P_1 = d_{\text{ion2}} - d_{\text{ion1}} + c(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) - c(\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{s1}),$$

$$L_4 = \lambda_1\varphi_1 - \lambda_2\varphi_2 = d_{\text{ion2}} - d_{\text{ion1}} + c(\varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}) - c(\varepsilon_{s2} - \varepsilon_{s1}) + N,$$

where P_4 – pseudoranges difference, obtained from the delay times at the two wavelengths λ_1 and λ_2 ; L_4 – pseudoranges obtained from phase delays at two wavelengths λ_1 and λ_2 ; $N = \lambda_1N_1 - \lambda_2N_2$ – phase ambiguities due to the whole number of wavelengths at the measurement distance.

Delay differences at different frequencies (called differential code biases) are denoted as follows:

$$D_s = \varepsilon_{s2} - \varepsilon_{s1}; D_r = \varepsilon_{r2} - \varepsilon_{r1}. \quad (5)$$

Thus, we obtain estimates of the TEC value:

$$\text{TEC}_P = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [P_4 + c(D_r + D_s)], \quad \text{TEC}_L = \frac{1}{A} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) [L_4 - N + c(D_r + D_s)], \quad (6)$$

where TEC_P – estimation of the total electron content obtained from the difference in arrival times of the radio signal at the two frequencies f_1, f_2 ; TEC_L – estimate of the total electron content obtained from the phase difference of the radio signals at the two frequencies.

Elimination of phase ambiguity and calculation of combined TEC. The P_4 and L_4 values are measured in the presence of noise. In this case the measurements L_4 are much less noisy compared to P_4 , but there remains the problem of phase ambiguity in determining the value of N . Thus, TEC estimates obtained from code data are usually characterized by a large fluctuation error (see Figure 4, *a*), while TEC estimates based on phase data are characterized by systematic errors (see Figure 4, *b*) associated with ambiguity. Under such conditions, the need for a method that eliminates the problem of phase ambiguity becomes obvious, in order to ensure high accuracy of the measured parameters. This is done by using the phase alignment procedure TEC_L to TEC_P obtained from the pseudoranges. In this phase alignment procedure, first the alignment constant B is determined by averaging over small time-difference intervals $P_4 - L_4$ [23, 24]:

$$B = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K [P_4(k) - L_4(k)] \approx -N, \quad (7)$$

where K – number of measurements; k – time index.

In order to minimize the effects of multipath and noise at low elevation angle in the estimation of the alignment constant B , it is recommended to limit the range of measurements considered, to data obtained within 10° of the peak elevation angle of each arc. As a result, a combined TEC estimate can be obtained:

$$\text{TEC} = \frac{1}{40.28} \left(\frac{f_1^2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} \right) \left[(B + L_4) + c(D_r + D_s) \right]. \quad (8)$$

Thus, the proposed approach will combine the advantages of the two methods for determining the total electron content in the ionosphere – by the difference of time and phase delays. Such a method has less noise emissions, and therefore allows a higher accuracy in estimating the total electron content in the ionosphere (see Figure 4, c).

Detection and correction of satellite navigation signal cycle slip. One of the problems in the post-processing of navigation signal data is the problem of cycle slip, which is a discontinuity in the phase synchronization of the satellite signal receiver (Figure 6). The causes of cycle slip are [2]: power loss, very low signal to noise ratio, receiver software failure, satellite oscillator failure, ionospheric distortion, obstacles in the signal path (buildings, trees etc.). Under such circumstances, when the satellite reappears, tracking resumes.

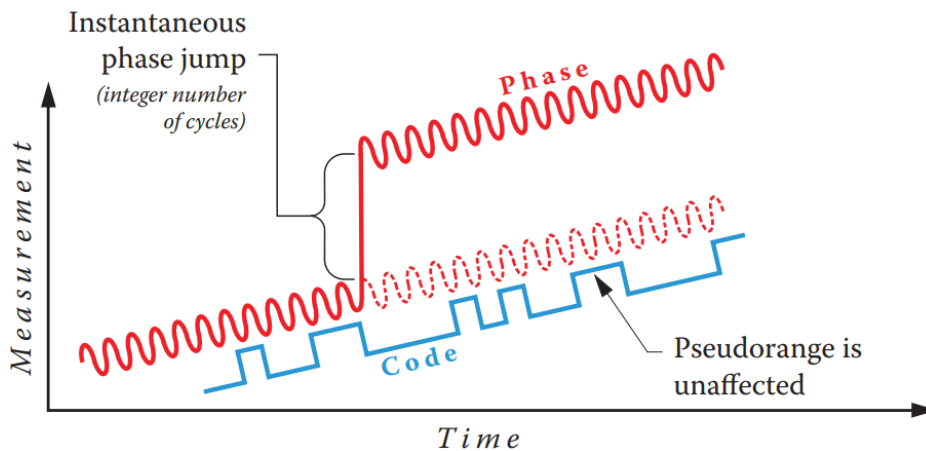


Figure 6. An example of a double difference cycle slip [2]

Cycle slip has the greatest effect on phase pseudoranges. If slippage occurs, its correction is necessary. Cycle slip detection algorithms are used together with correction, among which methods [25] stand out: Turbo Edit (TE), Melbourne–Wübbena wide-lane ambiguity (MWWL), forward and backward moving window averaging (FBMWA), etc. The best efficiency is characterized by modifications of the FBMWA algorithms, but they are not applicable for real-time processing [25]. The essence of this algorithm is reduced to the calculation of the mean value of the phase and its standard deviation in each of the epochs of observation. An epoch is defined as a time of continuous observation of a signal, when the data are not interrupted for more than a set value (for example, 60 s). When the current phase estimate differs from the average value in the previous epoch by more than the threshold value (6 standard deviations are most commonly used), cycle slip is considered detected and an appropriate correction is introduced to eliminate the slip. An example of the operation of such an algorithm is shown in Figure 4, d.

Determination of differential code biases and subsequent TEC correction. Another problem arising in the estimation of the total electron content of the ionosphere are differential code biases (DCBs) – these are systematic errors or biases between two observations of the GNSS code at the same or different frequencies [26]. DCBs are necessary for both navigational (code positioning of GNSS receivers) and non-navigational tasks [2]. Correct determination of DCBs is of key importance for ionospheric analysis, as they directly affect the accuracy of total ionospheric electron content measurements. An important problem in DCB estimation is that for all new and upgraded satellite navigation systems is required specification of DCB values (with several GNSS) and the selection of algorithms for their calculation [25]. To estimate the delays D_s and D_r , a method based on signal

decomposition by singular numbers using dual-frequency GNSS data was used [24, 28]. In this method, the satellite and receiver delays are considered unknown parameters, which are calculated with the help the least-squares method using the values of the vertical total electron content. Further, the calculated differential code biases were used in correcting the TEC values, an example of which calculations is shown in figure 4, *e*. It can be seen from the figures that the TECs after DCBs correction are characterized by a much smaller scatter of the relative mean value and do not have negative values.

Calculation of the vertical electron content. The value of the slant TEC is calculated by integrating the electron content along the path from the GNSS satellite to the GNSS receiver (Figure 7). This value is not very convenient, since it strongly depends on the satellite elevation angle α . It is more appropriate to use the value of the vertical total electron content (VTEC), which is defined as the integral concentration of electrons in a vertical column above the Earth's surface.

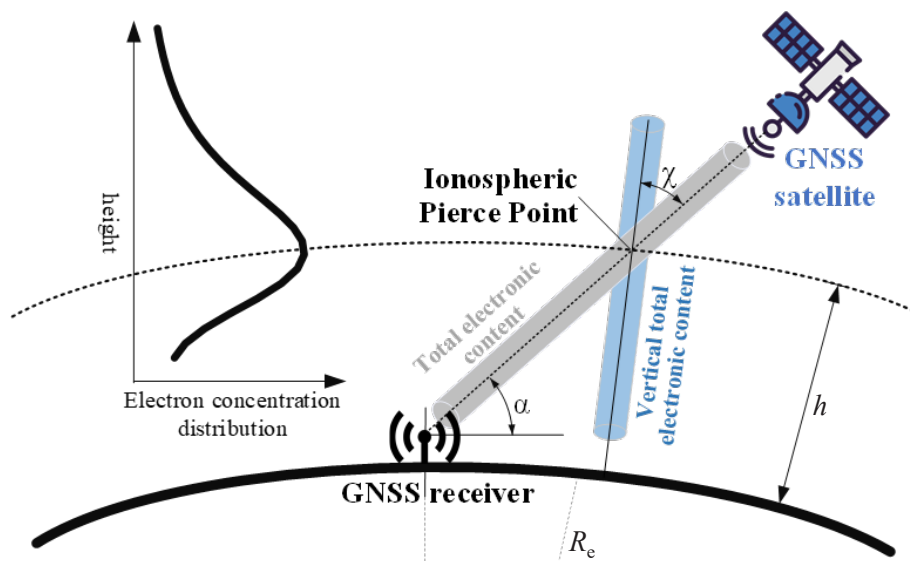


Figure 7. Value of vertical total electron content obtained from slant TEC

For this purpose, some height h is chosen at which the electron concentration distribution is maximal. The point at this height is called the Ionospheric Pierce Point and is set on the path connecting the satellite to the receiver [29]. The vertical total electron content (VTEC) is calculated from the slant TEC values (see Figure 7):

$$\text{VTEC} = \text{TEC} \cdot \cos\chi, \quad (9)$$

where $\chi = \arcsin \frac{R_e \cos\alpha}{R_e + h}$ – satellite's zenith angle; α – satellite elevation; R_e – equivalent radius of the Earth (equal to 6378.137 km); h – Ionospheric Pierce Point height (in this paper it was considered equal to 506.7 km).

An example of the VTEC calculation and its averaging results is shown in Figure 4, *f*.

Calculation of the vertical total electron content over the territory of the Republic of Belarus.

Software tools for processing of radio-tomographic data of high-orbit ionosphere control are written in Python 3.10 programming language, using third-party cross-platform libraries Matplotlib, NumPy, Plotly, SciPy, GeoRinex, pypmap3d, Xarray, Pandas. The final results of these software tools are the calculation, interpolation and visualization of the vertical total electron content for a given area.

Figure 8 shows examples of VTEC calculations over the territory of the Republic of Belarus based on data from 96 ground receiving stations at different time moments. It can be seen that, in general, the VTEC over the territory of the Republic of Belarus is distributed uniformly without sharp jumps and large heterogeneities. The concentration of electrons is higher in the daytime (see Figure 8, *a*) than in the early morning (see Figure 8, *b*).

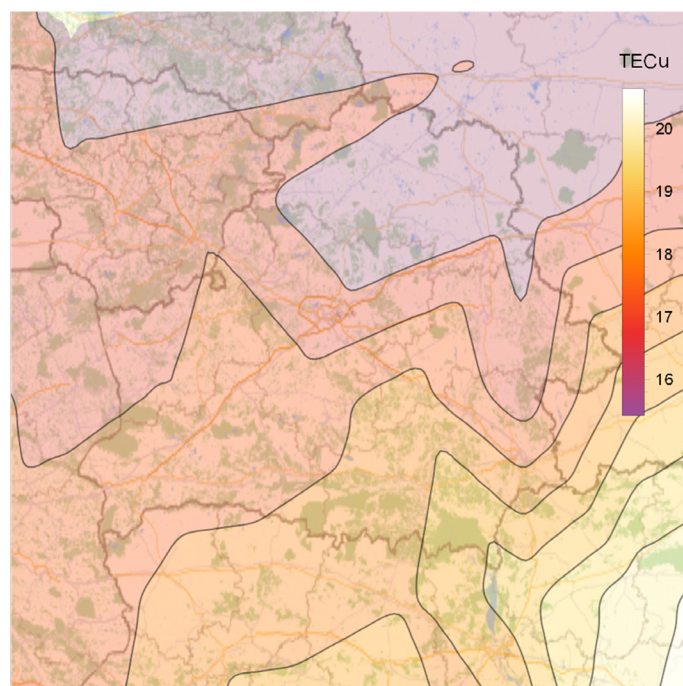
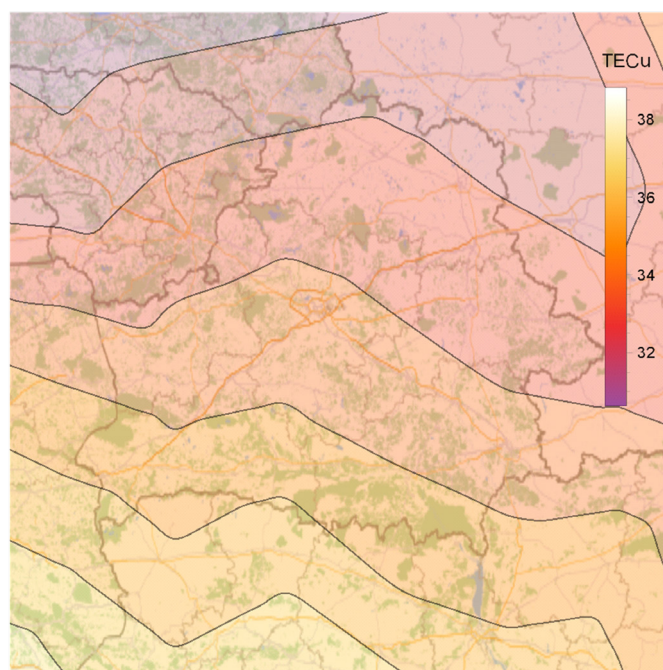
*a**b*

Figure 8. Example of calculation of the vertical total electron content at different time moments on April 23, 2023 according to 96 observation stations and GPS satellites over the territory of the Republic of Belarus and neighboring states: April 23, 2023, 05:00:00 (*a*); April 23, 2023, 15:00:00 (*b*)

Conclusion. The results of experimental studies of the total electron content in the ionosphere over the territory of the Republic of Belarus from data of global navigation satellite systems and ground receiving stations of the precise positioning system of the Republic of Belarus are presented. The structure of the ionosphere is analyzed and the expressions for calculating the total electron content using a dual-frequency measurement method with a combination of measurements by phase and code delays of radio signals are given on the basis of known dependencies. The results of algorithms for

elimination of cycle slip and estimation of differential code biases before and after correction are demonstrated. The set of developed algorithms was implemented in the Python 3.10 programming language using third-party cross-platform free libraries, resulting in calculation and visualization of vertical total electron content over the Republic of Belarus at different time moments. The direction of further research is the development and study of methods for three-dimensional reconstruction of electron distribution in the ionosphere based on the calculated data.

The obtained results are reasonable to use in monitoring of the ionosphere in order to provide reliable operation of radio systems, detection of ionospheric anomalies of natural and artificial origin, as well as forecasting of natural phenomena on their basis. In particular, monitoring of the spatial state of the ionosphere in the selected volume of near-Earth space in real time can be used by the State Enterprise “Belarusian NPP” and other interested organizations of the Republic of Belarus.

References

1. Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E. *GNSS – Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo, and More*. Springer, 2008. xxix, 516 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-211-73017-1>
2. Sickle J. Van. *GPS for Land Surveyors*. 4th ed. CRC Press, 2015. 368 p. <https://doi.org/10.1201/b18480>
3. Astafyeva E. Ionospheric detection of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, 2019, vol. 57, pp. 1265–1288. <https://doi.org/10.1029/2019RG000668>
4. Komjathy A., Yang Y.-M., Meng X., Verkhoglyadova O., Mannucci A. J., Langley R. B. Review and perspectives: Understanding natural-hazards-generated ionospheric perturbations using GPS measurements and coupled modeling. *Radio Science*, 2016, vol. 51, iss. 7, pp. 951–961. <https://doi.org/10.1002/2015RS005910>
5. Laštovička J. Long-Term Changes in Ionospheric Climate in Terms of foF2. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 1, art. ID 110. <https://doi.org/10.3390/atmos13010110>
6. Milanowska B., Wielgosz P., Krypiak-Gregorczyk A., Jarmołowski W. Accuracy of Global Ionosphere Maps in Relation to Their Time Interval. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13, no. 18, art. ID 3552. <https://doi.org/10.3390/rs13183552>
7. Galkin I., Fron A., Reinisch B., Hernández-Pajares M., Krankowski A., Nava B., Bilitza D. [et al.]. Global Monitoring of Ionospheric Weather by GIRO and GNSS Data Fusion. *Atmosphere*, 2022, vol. 13, no. 3, art. ID 371. <https://doi.org/10.3390/atmos13030371>
8. Zakharenkova I., Cherniak I., Braun J. J., Wu Q. Global Maps of Equatorial Plasma Bubbles Depletions Based on FORMOSAT-7/COSMIC-2 Ion Velocity Meter Plasma Density Observations. *Space Weather*, 2021, vol. 21, iss. 5, art. ID e2023SW003438. <https://doi.org/10.1029/2023SW003438>
9. Yasyukevich Y., Mylnikova A., Vesnin A. GNSS-Based Non-Negative Absolute Ionosphere Total Electron Content, its Spatial Gradients, Time Derivatives and Differential Code Biases: Bounded-Variable Least-Squares and Taylor Series. *Sensors*, 2020, vol. 20, no. 19, art. ID 5702. <https://doi.org/10.3390/s20195702>
10. Juan J. M., Sanz J., Rovira-Garcia A., González-Casado G., Ibanez D., Perez R. O. AATR an ionospheric activity indicator specifically based on GNSS measurements. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2018, vol. 8, art. ID A14. <https://doi.org/10.1051/swsc/2017044>
11. Rideout W., Coster A. Automated GPS processing for global total electron content data. *GPS Solut*, 2006, vol. 10, pp. 219–228. <https://doi.org/10.1007/s10291-006-0029-5>
12. Roma-Dollase D., Hernández-Pajares M., Krankowski A., Kotulak K., Ghoddousi-Fard R., Yunbin Yuan, Zishen Li [et al.]. Consistency of seven different GNSS global ionospheric mapping techniques during one solar cycle. *Journal of Geodesy*, 2018, vol. 92, pp. 691–706. <https://doi.org/10.1007/s00190-017-1088-9>
13. Zishen Li, Ningbo Wang, Hernández-Pajares M., Yunbin Yuan, Krankowski A., Ang Liu, Jiuping Zha [et al.]. IGS real-time service for global ionospheric total electron content modeling. *Journal of Geodesy*, 2020, vol. 94, art. ID 32. <https://doi.org/10.1007/s00190-020-01360-0>
14. Lean J. L., Meier R. R., Picone J. M., Sassi F., Emmert J. T., Richards P. G. Ionospheric total electron content: Spatial patterns of variability. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, vol. 121, iss. 10, pp. 10,367–10,402. <https://doi.org/10.1002/2016JA023210>
15. Huang C., Lu G., Zhang Y., Paxton L. J., eds. *Ionosphere Dynamics and Applications*. American Geophysical Union: Wiley, 2021. xi, 559 p. <https://doi.org/10.1002/9781119815617>
16. Naumov A. O., Khmarskiy P. A., Byshnev N. I., Piatrouski N. I. Methods and software for calculating total electron content based on GNSS data. 7th *Advanced Engineering Days (AED), 1–2 July 2023, Mersin, Türkiye*. Available at: <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/aed/article/view/1151> (accessed 2 July 2023).
17. Ignacio R. *RINEX. The Receiver Independent Exchange Format Version 4.00*. Darmstadt, IGS/RTCM RINEX WG, 2021. 120 p.

18. Materassi M., Forte B., Coster A., Skone S. *The Dynamical Ionosphere a Systems Approach to Ionospheric Irregularity*. Elsevier, 2020. 323 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01069-8>
19. Artemiev V. M., Naumov A. O., Stepanov V. L., Murashko N. I. Method and Results of Real Time Modeling of Ionosphere Radiotomography on the Basis of the Kalman Filter Theory. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2008, vol. 40, no. 2, pp. 52–62. <https://doi.org/10.1615/JAutomatInfScien.v40.i2.50>
20. Belokonov I. V., Krot A. M., Kozlov S. V., Kaplarchuk E. A., Savinykh I. E., Shapkin A. S. A method for estimating the total electron content in the ionosphere based on the retransmission of signals from the global navigation satellite system GPS. *Informatika = Informatics*, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 7–27 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-2-7-27>
21. Kaplarchuk E. A., Kozlov S. V., Savinykh I. E., Shapkin A. S. Processing of retransmitted global navigation satellite system GPS navigation signals in the problem of measuring the total electron content in the ionosphere. *Informatika = Informatics*, 2023, vol. 20, no. 3, pp. 30–45 (in Russian). <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2023-20-3-30-45>
22. Arikan F., Nayir H., Sezen U., Arikan O. Estimation of single station interfrequency receiver bias using GPS-TEC. *Radio Science*, 2008, vol. 43, RS4004. 13 p. <https://doi.org/10.1029/2007RS003785>
23. Naumov A., Khmarskiy P., Byshnev N., Piatrouski M. Methods and software for estimation of total electron content in ionosphere using GNSS observations. *Engineering Applications*, 2023, vol. 2, no. 3, pp. 243–253.
24. Themens D. R., Jayachandran P. T., Langley R. B., MacDougall J. W., Nicolls J. Determining receiver biases in GPS-derived total electron content in the auroral oval and polar cap region using ionosonde measurements. *GPS Solut*, 2013, vol. 17, pp. 357–369. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0284-6>
25. Hieu La Van, Ferreira V. G., He X., Tang X. Study on cycle-slip detection and repair methods for a single dual-frequency global positioning system (GPS) receiver. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 2014, vol. 20, no. 4, pp. 984–1004. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702014000400054>
26. Wang N., Yuan Y., Li Z., Montenbruck O., Tan B. Determination of differential code biases with multi-GNSS observations. *Journal of Geodesy*, 2016, vol. 90, no. 3, pp. 209–228. <https://doi.org/10.1007/s00190-015-0867-4>
27. Montenbruck O., Hauschild A., Steigenberger P. Differential Code Bias Estimation using Multi-GNSS Observations and Global Ionosphere Maps. *Navigation – Journal of the ION*, 2014, vol. 61, no. 3, pp. 191–201. <https://doi.org/10.1002/navi.644>
28. Wang Y., Zhao L., Gao Y. Estimation and Analysis of GNSS Differential Code Biases (DCBs) Using a Multi-Spacing Software Receiver. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 2, art. ID 443. <https://doi.org/10.3390/s21020443>
29. Komjathy A. *Global Ionospheric Total Electron Content Mapping Using the Global Positioning System*. University of New Brunswick, 1997. 265 p.

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-65-75>
УДК 678.7;621.7.011



Оригинальная статья

А. Б. Лаптев¹, А. М. Коган¹, Е. В. Николаев¹, А. А. Рогачев²,
Ж. В. Игнатович^{2*}, Ю. В. Матвеев²

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт» –
Федеральное государственное унитарное предприятие
«Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов»,
ул. Радио, 17, 105005, Москва, Российская Федерация

²Институт химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси,
ул. Ф. Скорины, 36, 220084, Минск, Республика Беларусь

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОЛУЧЕНИЯ И СТАРЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. На основе анализа литературных данных о возможности использования нейросетей для создания новых материалов с высокими функциональными свойствами рассматривается решение проблемы определения эксплуатационной устойчивости полимерных композиционных материалов путем создания физико-химически обоснованных математических моделей прогнозирования. В качестве матрицы модельного композиционного материала выбраны эпоксидные смолы марок УП-637 и ЭА с отвердителем изофорондиамин, а в качестве модификатора – олигобутадиеновый каучук марки СКН-10 КТР. Обоснованы направления исследований, необходимые для разработки методологии создания новых материалов с оптимальными свойствами, построения модели изменения свойств материалов при варьировании состава и осуществления полномасштабного математического моделирования физико-химических процессов старения полимерных композиционных материалов при изменении уровня и времени воздействия климатических факторов. Верификация полученной зависимости служебных характеристик от состава материала и уровня воздействующих климатических факторов производилась на основании данных натурных испытаний в умеренном климате. Предложенная методика моделирования свойств полимерных композиционных материалов позволит сократить сроки разработки новых материалов и создать полимерные композиты на основе эпоксидной смолы, содержащие наполнители различной природы (углеродные, минеральные и полимерные) с высокими эксплуатационными параметрами.

Ключевые слова: полимерные композиционные материалы, компьютерное моделирование, искусственные нейронные сети, климатическое старение

Благодарности: работа поддержана Российским научным фондом (грант № 23-49-10 047) и частично выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Климатические испытания» НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Лаптев Анатолий Борисович – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов, НИЦ «Курчатовский институт». <https://orcid.org/0000-0002-6680-1607>. E-mail: laptev@bk.ru; Коган Алексей Маркович – инженер, Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, НИЦ «Курчатовский институт». <https://orcid.org/0009-0006-6707-1390>. E-mail: alekseikogan@yandex.ru; Николаев Евгений Владимирович – кандидат технических наук, заместитель начальника Испытательного центра Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов, НИЦ «Курчатовский институт». <https://orcid.org/0009-0003-1464-5694>. E-mail: arx.86@mail.ru; Рогачев Александр Александрович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор Института химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0003-1464-5694>.

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

orcid.org/0000-0003-4993-0519. E-mail: rogachev78@mail.ru; *Игнатович Жанна Владимировна** – кандидат химических наук, заместитель директора по научной работе Института химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-3837-6877>. E-mail: ignatovichz@inbox.ru; *Матвеев Юрий Вячеславович* – кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией Института химии новых материалов Национальной академии наук Беларуси. E-mail: yurma@ichnm.mail.ru

Вклад авторов: *Лаптев Анатолий Борисович* – обоснование и планирование методологии исследования, анализ экспериментальных данных, интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Коган Алексей Маркович* – проведение эксперимента, написание текста рукописи, сбор экспериментальных данных, систематизация экспериментальных и модельных данных; *Николаев Евгений Владимирович* – проведение инструментальных исследований, анализ и систематизация данных, сбор данных моделирования; *Рогачев Александр Александрович* – обсуждение и интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; *Игнатович Жанна Владимировна* – редактирование текста рукописи, анализ и обобщение литературных данных, анализ и систематизация результатов; *Матвеев Юрий Вячеславович* – работа с графическим материалом, анализ результатов исследования.

Для цитирования: Математическое моделирование процессов получения и старения полимерных композиционных материалов / А. Б. Лаптев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 65–75. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-65-75>

Поступила в редакцию: 15.06.2023

Утверждена к публикации: 30.11.2023

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

Anatoly B. Laptev¹, Aleksei M. Kogan¹, Evgeniy V. Nikolaev¹, Alexander A. Rogachev²,
Zhanna V. Ihnatovich^{2*}, Yuri V. Matveenko²

¹National Research Center “Kurchatov Institute” – Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”,

17, Radio Str., 105005, Moscow, Russian Federation

²Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus,

36, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus

MATHEMATICAL MODELING OF THE CREATION PROCESS AND AGING OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS

Abstract. Based on the analysis of the literature on the possibility of using neural networks to create new materials with high functional properties, the article considers a solution to the problem of determining the operational stability of polymeric composite materials by creating physical and chemically sound mathematical prediction models. Epoxy resins of the UP-637 and EA brands with an isophorone diamine hardener were chosen as the matrix of the model composite material, and oligobutadiene rubber of the SKN-10 KTR brand was chosen as the modifier. It justifies directions of work necessary for development of new materials creation methodology with optimal characteristics, building a model for changing the properties of materials at variation of composition and implementation of full-scale mathematical modeling of physical and chemical processes of polymer composite materials aging at changing level and time of climatic factors influence. Verification of the obtained dependence of service characteristics on the composition of the material and the level of influencing climatic factors was carried out on the basis of data from full-scale tests in a temperate climate. The proposed methodology for modelling the properties of polymer composite materials will reduce the development time of new materials and allow creation of polymer composites based on epoxy resin containing fillers of various natures (carbon, mineral and polymer) with high performance parameters.

Keywords: polymer composite materials, computer modeling, artificial neural networks, climatic aging

Acknowledgments: the work was supported by the Russian Scientific Foundation (grant № 23-49-10 047) and was partially performed using the equipment of the Center for Collective Use “Climatic Tests” of the Kurchatov Institute Research Center – VIAM.

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Anatoly B. Laptev* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Chief Researcher at National Research Center “Kurchatov Institute” – Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”. <https://orcid.org/0000-0002-6680-1607>. E-mail: laptev@bk.ru; *Aleksei M. Kogan* – Engineer at National Research Center “Kurchatov Institute” – Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”. <https://orcid.org/0009-0006-6707-1390>. E-mail: alekseikogan@yandex.ru; *Evgeniy V. Nikolaev* – Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of the Testing Center at National Research Center “Kurchatov Institute” – Federal State Unitary Enterprise “All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials”. <https://orcid.org/0009-0003-1464-5694>. E-mail: arx.86@mail.ru; *Alexander A. Rogachev* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4993-0519>. E-mail: rogachev78@mail.ru; *Zhanna V. Ihnatovich** – Cand. Sci. (Chemistry), Deputy Director of Science at Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences

of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-3837-6877>. E-mail: ignatovichz@inbox.ru; Yuri V. Matveenko – Cand. Sci. (Chemistry), Leading Researcher, Head of the Laboratory at Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: yurma@ichnm.mail.ru

Contribution of the authors: *Anatoly B. Laptev* – substantiation and planning of research methodology, analysis of experimental data, interpretation of research results, editing of the text of the manuscript; *Alexei M. Kogan* – conducting an experiment, writing the text of the manuscript, collecting experimental data, systematization of experimental and model data; *Evgeniy V. Nikolaev* – conducting instrumental research, analysis and systematization of data, collection of modeling data; *Alexander A. Rogachev* – discussion and interpretation of research results, editing of the text of the manuscript; *Zhanna V. Ihnatovich* – editing the text of the manuscript, analysis and generalization of literary data, analysis and systematization of results; *Yuri V. Matveenko* – work with graphic material, analysis of research results.

For citation: Laptev A. B., Kogan A. M., Nikolaev E. V., Rogachev A. A., Ihnatovich Zh. V., Matveenko Yu. V. Mathematical modeling of the creation process and aging of polymer composite materials. *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 65–75 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-65-75>

Received: 15.06.2023

Approved for publication: 30.11.2023

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. В настоящее время общемировым трендом является постепенная замена металлических материалов, подверженных коррозии, полимерными композиционными материалами (ПКМ), которые имеют большую прочность при низкой плотности, высокую химическую стойкость. Использование ПКМ предполагает значительное повышение эффективности технических устройств за счет, например, снижения их веса, что приводит к уменьшению потребления энергоресурсов при создании и эксплуатации таких устройств. Если процесс создания металлических материалов методом проб и ошибок занял длительное время (в течение нескольких тысячелетий), то при разработке новых материалов появилась возможность значительно ускорить этот процесс путем использования цифровых моделей.

Создание материалов с заданными, порой уникальными, свойствами, а также определение работоспособности изделий из ПКМ выполняется с использованием интуитивных методов, основанных на опыте исследователей и научных данных. Оценка полученных материалов, в том числе на основе полимеров, и поиск оптимальных решений осуществляются с помощью компьютерного моделирования и искусственного интеллекта (нейронных сетей) [1].

Как правило, при создании ПКП учитывают влияние наполнителей различной природы, внешних факторов (излучение различной длины волны и интенсивности, температуры) на структурно-фазовые изменения и физико-механические свойства, а также на эксплуатационные характеристики получаемых материалов. Большой объем экспериментального материала в таких работах не подвергается дополнительной математической обработке, что не позволяет систематизировать данные об изменении свойств полученных материалов при длительном воздействии на них различных комплексных факторов, имеющих место в реальных условиях эксплуатации.

В [2] представлен метод прогнозирования свойств ПКМ с использованием нейросетевого моделирования на основе данных томографии. В качестве объекта исследования рассматриваются углеродные волокна, изготовленные по технологии вакуумной инфузии с эпоксидным связующим, что обуславливает наличие большого количества случайных микро- и макродефектов. Разработана методика нейросетевого моделирования включающая алгоритм преобразования изображений томографа в данные структурно-фазового состава и физико-механические свойства объекта исследования.

Нейросетевое моделирование сложных неупорядоченных систем на основе высокомолекулярных соединений является непростой задачей, особенно при проектировании полимеров с желаемым фазовым поведением и точным прогнозированием их эксплуатационных характеристик [3]. Решение данной задачи вызывает затруднения при создании многокомпонентных систем на основе высокомолекулярных соединений, таких как инженерные пластмассы, которые находят широкое применение в промышленности. Влияние модификации мономера (повторяющейся единицы полимера) на полимеризацию и результирующие свойства полимера нелегко исследовать экспериментально, учитывая большое количество возможных изменений. Это обуславливает существенные ограничения при разработке новых полимеров со специфическими свойствами

конечного использования. В процессе создания следует учитывать длину макромолекул и их молекулярно-массовое распределение, а приемы регулирования данных параметров являются важным инструментом получения полимерных материалов с заданным физическими и химическими свойствами.

Для разработки новых материалов требуется глубокое понимание взаимосвязи между структурой и свойствами. Однако эта взаимосвязь в силу своей сложности не всегда исследуется всесторонне.

Теория функционала плотности (DFT) пригодна для оценки свойств аморфно-кристаллических полимеров, но требует больших вычислительных затрат. Она была применена к малым молекулам, и в рамках Гарвардского проекта по чистой энергии создана база данных насчитывающая 20 000 единиц хранения [4].

Использование подмножества данных, представления молекул в виде графов (с отдельными атомами в качестве вершин и связями в качестве ребер), а также подходов нейронной дактилоскопии, расширяющейся на основе упрощенной системы линейного ввода молекулярных данных (SMILES), позволило с большой вероятностью спрогнозировать высокие растворимость, эффективность лекарств и фотоэлектрическую эффективность ПКМ, исследованных в [5].

В [6] теоретически изучено влияние приложенной нагрузки, скорости скольжения на износостойкие свойства сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) и ПКМ на его основе. Используя опубликованные ранее экспериментальные результаты, с помощью разработанной искусственной нейронной сети (ИНС) была проведена их валидация с результатами, полученными путем моделирования. Нейронная сеть прямого распространения (FFNN) с обратным распространением ошибки (BPNN) использовалась для прогнозирования износа композитов из СВМПЭ при сухом скольжении. При построении предлагаемой ИНС было применено 11 входных векторов. Углеродные нанотрубки, углеродные волокна, оксид графена и добавки волластонита в матрице СВМПЭ являлись основными входными параметрами, а объемный износ – выходным параметром для разработанной ИНС. Отмечено, что скорость скольжения и приложенная нагрузка оказывают большее влияние на объемный износ композитов из СВМПЭ по сравнению с другими входными параметрами, а условием для достижения желаемых характеристик износа таких материалов является подбор процентного содержания по массе, размеру и составу частиц наполнителя. Установлено, что предложенная модель ИНС и полученная математическая модель хорошо согласуются с результатами испытаний и могут применяться для прогнозирования объемного износа композитов на основе СВМПЭ [6].

Ненасыщенные полиэфирные смолы широко используются для получения композиционных материалов и удовлетворяют большинству практических требований для промышленного и бытового применения при низкой стоимости [6]. Эти смолы состоят из высоковязкого полиэфирного олигомера и реакционноспособного растворителя, что обеспечивает их технологическую способность к образованию пространственных связей. Вязкость исходного полиэфира и реакционноспособной смеси разбавителей имеет решающее значение для практического применения. Ранее этот параметр определялся методом проб и ошибок, что подразумевало трудоемкую последовательность манипуляций для достижения целевых значений вязкости. Исследователи разработали стратегию прогнозирования рецептуры ненасыщенных полиэфиров на основе нейронных сетей. На первом этапе 15 ненасыщенных полиэфиров были синтезированы путем высокотемпературной поликонденсации с использованием обычных мономеров. Экспериментальные значения параметра растворимости Хансена (HSP) были определены с помощью программного обеспечения, а температура стеклования (T_g) – по данным дифференциальной сканирующей калориметрии (DSC). Количественная взаимосвязь структуры и свойств в сочетании со множественными линейными регрессиями использовалась для получения прогноза параметров растворимости Хансена δ_d , δ_p и δ_h по структурному составу и для температуры стеклования (прогноз по сравнению с экспериментальным коэффициентом определения $R^2 = 0,93$) этих ненасыщенных полиэфиров. Затем они были разбавлены несколькими растворителями различной природы (эфиры, сложные эфиры, спирт, ароматические соединения) в разной концентрации. Благодаря нейронным сетям правильный подбор экологически чистых реакционноспособных растворителей значительно ускорился.

Методы машинного обучения показали многообещающие результаты в прогнозировании свойств, и при наличии достаточных обучающих данных такие подходы могут обеспечить быстрый высокопроизводительный виртуальный скрининг различных соединений [7]. Появившиеся в последние годы архитектуры нейронных сетей на основе графов представляют собой наиболее успешный подход к прогнозированию молекулярной структуры целевых соединений.

Приведенные исследования можно рассматривать в качестве примеров использования нейросетей для оценки свойств полимерных материалов. Важным является не только определение каких-то отдельных характеристик, но и возможность создавать материалы с оптимальными свойствами, что было неоднократно продемонстрировано при разработке смесевых материалов с использованием метода планирования эксперимента для создания ингибиторов коррозии и коррозионно-механического разрушения сталей в сероводородсодержащих минерализованных средах [7].

В связи с этим предлагается использование методов планирования эксперимента для поиска оптимальных решений и обработка данных с использованием нейросетевых программ при составлении целевых композиций полимерных материалов на основе эпоксидных смол и определении изменения свойств данных материалов при воздействии климатических и эксплуатационных факторов.

Цель работы – обоснование методологии создания новых материалов с оптимальными свойствами с использованием математических компьютеризированных методов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) определить состав и концентрацию компонентов ПКМ;
- 2) оценить характеристики материалов в исходном состоянии и после ускоренных климатических испытаний (температура, влажность, солнечное излучение и др.), учитывая их потребительские свойства;
- 3) построить и верифицировать модели изменения свойств материалов при варьировании состава и при изменении уровня и времени воздействия климатических факторов; верификацию моделей провести на основании сравнения с контрольными образцами, экспонированными в натурных климатических условиях;
- 4) разработать методологию создания и прогнозирования свойств новых ПКМ.

Материалы и методы исследования. В качестве объектов исследования были выбраны следующие материалы: эпоксидные смолы марок УП-637 и ЭА, отвердитель изофорондиамин и модификатор – олигобутадиеновый каучук марки СКН-10 КТР. Температура фазовых превращений определялась методом ДМА на приборе Netzsch 242С (Германия) или ДСК на приборе Netzsch DSC 204 «Phoenix» (Германия), а прочность при изгибе – на испытательной машине ИР5282-50 (Россия).

Для каждого испытуемого образца рассчитывали массовую долю поглощенной в процессе испытаний воды (ε , %) по формуле

$$\varepsilon = \frac{m_2 - m_1}{m_1} 100, \quad (1)$$

где m_1 – масса испытуемого образца после первоначального просушивания и перед погружением во влажную среду, мг; m_2 – масса испытуемого образца после выдержки во влажной среде, мг.

За результат испытания принималось среднеарифметическое значение трех показателей, полученных при одинаковой продолжительности выдержки во влажной среде.

Планирование эксперимента по оценке процесса старения материала с использованием ИНС. Для оценки всех комбинаций параметров X_1 , X_2 , X_3 достаточно проведения опытов при максимальных и минимальных

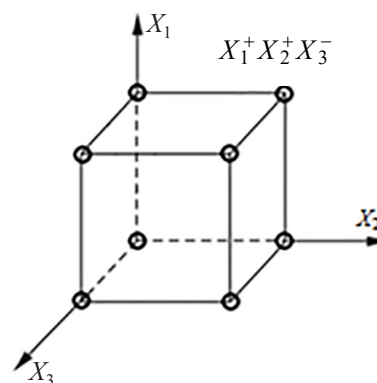


Рис.1. Схема вариаций факторов X_1 , X_2 , X_3

Fig.1. Scheme of variations of factors X_1 , X_2 , X_3

значениях параметров и всех их сочетаниях. На рис. 1 показан виртуальный куб возможных значений параметров.

В табл. 1 приведена матрица планирования для трехфакторного эксперимента с заранее задаваемыми значениями X_i и получаемыми характеристиками Y_i .

Т а б л и ц а 1. Рабочая матрица планирования эксперимента

Table 1. Work matrix of experimental planning

Номер опыта Experience number	Значение фактора Factor value			Значение характеристики Y_i Characteristic value Y_i
	X_1	X_2	X_3	
1	+	+	+	Y_1
2	+	+	–	Y_2
3	+	–	–	Y_3
4	–	–	–	Y_4
5	–	–	+	Y_5
6	–	+	+	Y_6
7	–	+	–	Y_7
8	+	–	+	Y_8

Зависимость параметра оптимизации Y_i от выбранных факторов X_i выражается уравнением регрессии

$$Y = f(X_1 X_2 X_3). \quad (2)$$

Варьируемыми факторами в данном эксперименте будут процентные содержания эпоксидных смол марок УП-637 и ЭА (базовый состав – добавление до 100 %), отвердитель изофорондиамин (от 15 до 20 мас.%) и модификатор – олигобутадиеновый каучук марки СКН-10 КТР (от 1 до 15 мас.%).

В табл. 2 приведены составы полимерных композиций.

Т а б л и ц а 2. Значения концентраций веществ в полимерной композиции

Table 2. Concentrations of substances in the polymer composition

Партия Consignment	Смола УП-637 Resin УП-637	Смола ЭА Resin ЭА	Каучук СКН-10КТР Rubber СКН-10КТР	Значение служебной характеристики, Y_i Service characteristic value, Y_i
1	–	100	0	Y_1
2			10	Y_2
3	30	70	0	Y_3
4			10	Y_4
5	70	30	0	Y_5
6			10	Y_6
7	100	–	0	Y_7
8			10	Y_8
9 (контрольная)	70	20	10	Y_0^*

Примечание. * – значение служебной характеристики при произвольном выборе концентраций ингредиентов для проверки адекватности получаемой зависимости.

Note. * – the value of the performance characteristic for an arbitrary choice of ingredient concentrations to check the adequacy of the resulting dependence.

После проведения экспериментов и получения данных о служебной характеристике материала с использованием нейросети формируется уравнение (2). Проверку адекватности данного уравнения планируется выполнять с использованием значений служебных характеристик композиции с содержанием 70 : 20 : 10 мас.% соответствующих ингредиентов. Влияние действующих факторов окружающей среды и времени будет оцениваться на трех рассчитанных по урав-

нению композициях с максимальными характеристиками: температурой стеклования, пределом прочности при изгибе либо бóльшими величинами обеих характеристик.

Исследование климатической стойкости должно проводиться на композициях с оптимальными служебными характеристиками, то есть либо с максимальным пределом прочности на изгиб, либо с максимальной относительной деформацией, либо со средними значениями обеих характеристик.

Для оценки воздействия климатических факторов на полученные композиции связующего планируется использовать подход, аналогичный предыдущему опыту для каждого из трех типов образцов. При этом значения переменных X_4 , X_5 , X_6 , аналогично табл. 1, будут принимать значения варьируемых параметров климата (температура X_4 – от минус 10 до 30 °С, относительная влажность X_5 – от 10 до 96 %, световой поток УФ-излучения X_6 – от 0 до 30 Вт/м²).

Основные приемы анализа данных с использованием обучаемых нейросетей. Создание систем машинного обучения, кроме методов, моделей и технологий, традиционно используемых для решения сложных, трудно формализуемых, интеллектуальных задач (например, имитационного моделирования [8], исследования операций, кластеризации, искусственного интеллекта [9]) реализуется с помощью глубокого и гибридного обучения. Кроме того, ведутся интенсивные исследования в области разработки интеллектуальных информационных технологий, к которым в первую очередь относятся нейросетевые технологии. Особенно важным в этих исследованиях представляется изучение и использование на практике новых подходов и методов для решения сложных задач управления жизненным циклом материала, эволюционного и прогнозного моделирования [10], создания цифровых двойников материалов и машин.

Методы машинного обучения применяются в самых различных областях, например, в материаловедении при создании новых материалов, в том числе для прогнозирования прочностных и деформационных характеристик материалов в зависимости от их структуры, технологии изготовления и условий эксплуатации.

При решении задачи математического моделирования процесса создания и старения полимерных композиционных материалов необходимо описание таких алгоритмов машинного обучения, как ансамбли решающих деревьев и нейронные сети. Для получения расчетных зависимостей свойств полимерных материалов от их состава предпочтительно использовать абстрагированные от химической и физической природы величины – приведенные значения факторов. Применение при создании материалов ингредиентов с постоянными и стабильными свойствами позволяет избегать сложных квантово-химических расчетов и сосредоточиться на точном дозировании компонентов смесей полимерных материалов при проведении эксперимента.

Искусственные нейронные сети. ИНС являются одним из алгоритмов машинного обучения, который отличается большей сложностью и более широкой применимостью, чем другие алгоритмы.

В ИНС нейрон – это вычислительная единица, которая получает информацию, производит над ней простые вычисления и передает ее дальше. Один нейрон напоминает обобщенную логистическую регрессию. Обобщенную, потому что активационная функция у нейрона может быть произвольной, а не только сигмоидальной, как у логистической регрессии.

В остальном нейрон также получает входные сигналы (исходные данные либо выходные сигналы других нейронов) через несколько входных каналов, складывает полученные из входов числа и с учетом их значимости пропускает через активационную функцию для получения ответа. Таким образом, принцип работы нейронной сети заключается в преобразовании входных сигналов, в результате чего изменяется внутреннее состояние сети и формируются выходные значения [11].

На рис. 2 показана упрощенная схема ИНС, используемой для расчета служебных характеристик в течение длительного воздействия климатических факторов.

Предположим, что существует ряд нейронов (в нашем случае коэффициенты уравнения регрессии b_j), которые передают информацию следующему. В таком случае набор коэффициентов, соответствующих каждому из этих нейронов. У нейронов с большим весом информация будет доминирующей в следующем нейроне. Таким образом, выбираются наиболее значимые факторы.

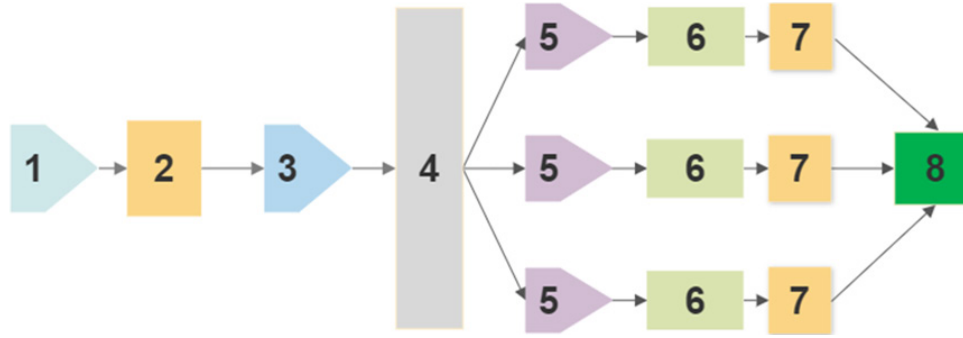


Рис. 2. Схема расчетно-экспериментальной зависимости свойств от состава полимерного материала и уровня действующих климатических факторов: 1 – приготовление девяти композиций различного состава и экспериментальная оценка служебных характеристик; 2 – расчетное получение зависимости характеристик от состава композиций; 3 – расчет оптимальных составов композиций с высокими характеристиками; 4 – изготовление рассчитанных составов и постановка на климатические испытания; 5 – проведение климатических испытаний трех композиций при воздействии восьми различных сочетаний климатических факторов в специализированных камерах и одной композиции в наружных условиях на климатической площадке, экспериментальная оценка служебных характеристик полимерных материалов; 6 – получение зависимости характеристик каждой композиции от уровня значений климатических факторов; 7 – расчетное определение с использованием ИНС зависимости свойств полимерных материалов от их состава и уровня действующих климатических факторов; 8 – верификация полученной зависимости

Fig. 2. Scheme of calculation and experimental development of dependence of properties on composition of polymer material and level of operating climatic factors: 1 – preparation of nine compositions of different content and experimental evaluation of performance; 2 – calculation of dependence of characteristics on content of compositions; 3 – calculation of optimal compositions with high characteristics; 4 – production of calculated formulations and climate testing; 5 – conducting climatic tests of three compositions under the influence of eight different combinations of climatic factors in specialized chambers and one composition in the outdoor environment on a climatic site, pilot performance evaluation of polymer materials; 6 – obtaining dependence of characteristics of each composition on the level of values of climatic factors; 7 – calculation using INS of dependence of properties of polymer materials on their composition and level of operating climatic factors; 8 – verification of the obtained dependency

Каждый сигнал X_i (1, рис. 2) умножается на свой вес b_i , после чего данное произведение преобразуется в сумматоре (3, рис. 2) и получается суммарный сигнал Y (4, рис. 2). Выходной сигнал можно определить по следующей формуле:

$$Y = f(b_0 X_0 + b_1 X_1 + \dots + C),$$

где X_i – входной сигнал; b_i – вес (настраиваемый параметр); C – смещение (настраиваемый параметр). В итоге с использованием ИНС можно получить уравнение вида (6, рис. 2)

$$Z_j = f(X_4 X_5 X_6),$$

где Z_j – значение служебной характеристики (например, предела прочности при изгибе) каждого из трех образцов, имеющей оптимальный состав после воздействия климатических факторов.

Методом факторного эксперимента построена регрессионная модель изменения твердости связующего при воздействии температуры и влажности (рис. 3). Коэффициент аргумента температуры имеет отрицательное значение, а коэффициент аргумента влажности – положительное, следовательно, варьируя значения температуры и влажности и их переменного воздействия можно обеспечивать стабильность свойств материала на требуемом уровне.

Дальнейшие расчеты с использованием ИНС позволят получить расчетную зависимость служебной характеристики материала (предела прочности при изгибе) от состава материала и уровня действующих климатических факторов (8, рис. 2), выражаемую уравнением

$$Z_j = f(X_4; X_5; X_6; Y). \quad (3)$$

Проверка адекватности полученного уравнения (3) будет производиться с использованием значений служебных характеристик материала после натурной экспозиции Z_{0i} , при которой ежедневно фиксируется изменение метеопараметров X_4, X_5, X_6 .

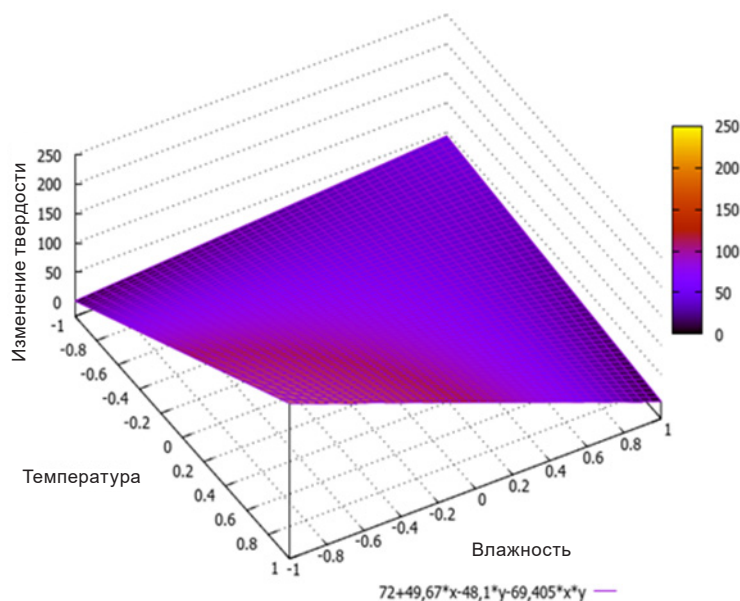


Рис. 3. Регрессионная модель изменения величины твердости связующего при воздействии температуры и влажности

Fig. 3. Regression model for the variation of the hardness of the binder under the influence of temperature and humidity

Для построения ИНС необходимо учесть архитектуру ИНС (модель сети, число элементов и их связи), функцию потерь (ее минимум будет соответствовать наилучшему решению), метод оптимизации, метрики (показывают точность решения задачи). В свою очередь архитектура нейронной сети построена на принципах сжатия, анализа и оптимизации данных [12].

Преимуществом нейронных сетей перед традиционными алгоритмами является возможность их обучения. Нейронные сети улучшаются на основе поступающих данных и произошедших ошибок. В случае оценки свойств материала обучение может производиться на основании снятия образцов материалов с натурной экспозиции в последующие годы [13].

Решающие правила в машинном обучении – это правила вида «если, то», которые определяют принадлежность объекта к заданному классу (используется в задачах классификации). Допустим, если значение Y отклоняется на $\pm 50\%$ от проверочного значения в Y_0 , то необходимо ввести дополнительный член в уравнения (1) и (2).

По аналогии с принципами построения решающих деревьев [14] выстроена схема расчетно-экспериментального определения зависимости свойств полимерного материала от его состава и действующих климатических факторов.

Известными ансамблями моделей, направленных на объединение «слабых» алгоритмов в группу «сильных», являются стекинг, бэггинг и бустинг.

В случае стекинга используются разнородные отдельно взятые модели, которые подаются на вход, а выходом является итоговый прогноз.

При использовании бэггинга рассматриваются однородные модели, обучающиеся независимо и параллельно, а затем их результаты усредняются. Примером такого метода является случайный лес.

Для решения нашей задачи использован метод бустинга, при котором строят последовательно обучаемые однородные модели. Алгоритм метода бустинга хорошо организован в нескольких специальных библиотеках, например в CatBoost, XGBoost, LightGBM [15].

Заключение. С использованием ИНС разработан план эксперимента по получению функциональной зависимости служебной характеристики полимерного материала, которая охватывает необходимое и достаточное количество сочетаний компонентов в композиции полимера. Анализ служебной характеристики материала произведен с использованием ИНС методом бустинга. Установлено, что включение в эксперимент второго этапа – климатического воздействия дает

возможность оценить и получить зависимость изменения служебных характеристик полимерного материала при любом сочетании климатических факторов, то есть определить климатическую стойкость полимера во всех климатических зонах. Верификация полученной зависимости служебных характеристик от состава материала и уровня воздействующих климатических факторов производится на основании данных натуральных (в естественном климате) условий. Это позволяет на протяжении длительного срока корректировать полученную зависимость после каждого снятия, получения характеристик образцов и их анализа.

Таким образом, разработка методики моделирования свойств ПКМ с использованием ИМС позволит сократить сроки разработки новых материалов и создать полимерные композиты на основе эпоксидной смолы, содержащие микро- и наноструктурные наполнители различной природы (углеродные, минеральные и полимерные) с высокими эксплуатационными параметрами.

Список использованных источников

1. Дисперсно-наполненные полимерные композиты технического и медицинского назначения / Б. А. Люкшин [и др.]. – Новосибирск: Изд. СО РАН, 2017. – 311 с.
2. Method of Predicting the Polymer Composites' Properties Using Neural Network Modeling / D. Vdovin [et al.] // MATEC Web Conf. (ICMTMTE 2021). – 2021. – Vol. 346, № 2. – Art. ID 02015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134602015>
3. Machine learning enables polymer cloud-point engineering via inverse design / J. N. Kumar [et al.] // npj Comput. Mater. – 2019. – Vol. 5. – Art. ID 73. <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0209-9>
4. Kumar, J. N. Challenges and opportunities of polymer design with machine learning and high throughput experimentation / J. N. Kumar, Q. Li, Y. Jun // Communications. – 2019. – Vol. 9. – P. 537–544. <https://doi.org/10.1557/mrc.2019.54>
5. Xie, T. Hierarchical visualization of materials space with graph convolutional neural networks / T. Xie, J. C. Grossman // J. Chem. Phys. – 2018. – Vol. 149, № 17. – Art. ID 174111. <https://doi.org/10.1063/1.5047803>
6. Kurt, H. I. Application of a Neural Network Model for Prediction of Wear Properties of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Composites / H. I. Kurt, M. Oduncuoglu // Int. J. Polym. Sci. – 2015. – Vol. 2015. – Art. ID 315710. <https://doi.org/10.1155/2015/315710>
7. Разработка механизма старения ПЭТФ в условиях воздействия тепла, влаги и ультрафиолетового излучения / А. Б. Лаптев [и др.] // Вopr. материаловедения. – 2021. – № 2 (106). – С. 146–160. <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-106-2-146-160>
8. Полковникова, Н. А. Нейросетевые технологии, нечеткая кластеризация и генетические алгоритмы в экспертной системе / Н. А. Полковникова, В. М. Курейчик // Изв. ЮФУ. Техн. науки. – 2014. – № 7 (156). – С. 7–15.
9. Потенциал искусственного интеллекта при реализации генеративных образовательных технологий / К. Е. Романова [и др.] // Инженер. образование. – 2019. – № 26. – С. 75–83.
10. Мелихова, О. А. Применение генетических алгоритмов для построения систем искусственного интеллекта / О. А. Мелихова // Изв. ЮФУ. Техн. науки. – 2013. – № 7 (144). – С. 53–58.
11. Келлер, Ю. А. Разработка искусственных нейронных сетей для предсказания технологической эффективности от выравнивания профиля приемистости / Ю. А. Келлер // Изв. Том. политех. ун-та. Информ. технологии. – 2014. – Т. 325, № 5. – С. 60–65.
12. Van Veen, F. Neural Network Zoo [Electronic resource] / F. Van Veen, S. Leijnen // The Asimov Institute. – 2021. – Mode of access: www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo. – Date of access: 15.09.2021.
13. Павлова А. И. Информационные технологии: основные положения теории искусственных нейронных сетей / А. И. Павлова. – Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т экономики и управления, 2017. – 191 с.
14. Баженов, Р. И. Интеллектуальные информационные технологии в управлении / Р. И. Баженов. – Саратов: Ай Пи Эр Медиа, 2018. – 117 с.
15. Николенко, С. Глубокое обучение / С. Николенко, А. Кадурин, Е. Архангельская. – СПб.: Питер, 2021. – 480 с.

References

1. Lyukshin B. A., Shil'ko S. V., Panin S. V., Mashkov Yu. K., Kornienko L. A., Lyukshin P. A., Pleskachevskii Yu. M. [et al.]. *Dispersed-filled polymer composites for technical and medical purposes*. Novosibirsk, Publ. House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2017. 311 p. (in Russian).
2. Vdovin D., Abramochkin A., Borodulin A., Nelyub V. Method of Predicting the Polymer Composites' Properties Using Neural Network Modeling. *MATEC Web of Conferences (ICMTMTE 2021)*, 2021, vol. 346, no. 2, art. ID 02015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202134602015>
3. Kumar J. N., Qianxiao Li, Tang K. Y. T., Buonassisi T., Gonzalez-Oyarce A. L., Jun Ye. Machine learning enables polymer cloud-point engineering via inverse design. *npj Computational Materials*, 2019, vol. 5, art. ID 73. <https://doi.org/10.1038/s41524-019-0209-9>
4. Kumar J. N., Qianxiao Li, Ye Jun. Challenges and opportunities of polymer design with machine learning and high throughput experimentation, *Communications*, 2019, vol. 9, pp. 537–544. <https://doi.org/10.1557/mrc.2019.54>

5. Xie T., Grossman J. C. Hierarchical visualization of materials space with graph convolutional neural networks. *The Journal of Chemical Physics*, 2018, vol. 149, no. 17, art. ID 174111. <https://doi.org/10.1063/1.5047803>
6. Kurt H. I., Oduncuoglu M. Application of a Neural Network Model for Prediction of Wear Properties of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene Composites. *International Journal of Polymer Science*, 2015, vol. 2015, art. ID 315710. <https://doi.org/10.1155/2015/315710>
7. Laptev A. B., Nesterov A. S., Vardanyan A. M., Nikolaev E. V. Development of the PET aging mechanism under conditions of exposure to heat, moisture and ultraviolet radiation. *Voprosy materialovedeniya*, 2021, no. 2 (106), pp. 146–160 (in Russian). <https://doi.org/10.22349/1994-6716-2021-106-2-146-160>
8. Polkovnikova N. A., Kureichik V. M. Neural network technologies, fuzzy clustering and genetic algorithms in an expert system. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Science*, 2014, no. 7 (156), pp. 7–15 (in Russian).
9. Romanova K. E., Mishurov S. S., Rumyantsev E. V., Matrokhin A. Yu. The potential of artificial intelligence in the implementation of generative educational technologies. *Inzhenernoye obrazovaniye [Engineering Education]*, 2019, no. 26, pp. 75–83 (in Russian).
10. Melikhova O. A. Application of genetic algorithms for building artificial intelligence systems. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Science*, 2013, no. 7 (144), pp. 53–58 (in Russian).
11. Keller Yu. A. Development of artificial neural networks to predict technological efficiency from injectivity profile alignment. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Informatsionnyye tekhnologii [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Information Technology]*, 2014, vol. 325, no. 5, pp. 60–65 (in Russian).
12. Van Veen F., Leijnen S. *Neural Network Zoo*. The Asimov Institute. Available at: www.asimovinstitute.org/neural-network-zoo (accessed 15.09.2021) (in Russian).
13. Pavlova A. I. *Information Technology: the Main Provisions of the Theory of Artificial Neural Networks*. Novosibirsk, Novosibirsk State University of Economics and Management, 2017. 191 p. (in Russian).
14. Bazhenov R. I. *Intelligent Information Technologies in Management*. Saratov, IP Air Media, 2018. 117 p. (in Russian).
15. Nikolenko S., Kadurin A., Arkhangelskaya E. *Deep Learning*. St. Petersburg, Piter Publ., 2021. 480 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ****DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS**<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-76-88>
УДК 621.039.736Оригинальная статья**Т. Г. Леонтьева^{1*}, Л. Н. Москальчук^{1,2}, А. А. Баклай¹, Н. А. Маковская¹**¹Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси, а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь²Белорусский государственный технологический университет,
ул. Свердлова, 13а, 220006, Минск, Республика Беларусь**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ СОРБЕНТОВ
НА ИММОБИЛИЗАЦИЮ ¹³⁷Cs В ЦЕМЕНТНОМ КОМПАУНДЕ
И ЕГО МЕХАНИЧЕСКУЮ ПРОЧНОСТЬ**

Аннотация. Выполнены исследования по определению основных параметров, характеризующих качество цементных компаундов: скорость выщелачивания ¹³⁷Cs и механическая прочность. В качестве сорбционных добавок использовались алюмосиликатные сорбенты, полученные из глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» в результате водной и кислотной-водной обработки для повышения содержания глинистого минерала иллита, являющегося основным компонентом в составе алюмосиликатных сорбентов. В качестве жидких радиоактивных отходов использовались модельные водные растворы ¹³⁷Cs, в том числе с содержанием NaNO₃ 150 г/дм³. Установлено, что использование алюмосиликатных сорбентов позволяет снизить скорость выщелачивания ¹³⁷Cs из цементных компаундов, что свидетельствует о более высокой степени фиксации ¹³⁷Cs в матричном материале по сравнению с образцами цементных компаундов без сорбционных добавок. Эффективность алюмосиликатного сорбента для иммобилизации ¹³⁷Cs при цементировании модельного раствора жидких радиоактивных отходов в 3 раза выше известной и широко используемой на практике сорбционной добавки (бентонитовая глина месторождения «10-й Хутор», Хакасия, Россия). Определение механической прочности образцов цементных компаундов с добавкой 5–15 % алюмосиликатных сорбентов показало, что данный показатель в 8–9 раз выше нормативного значения (4,9 МПа). Оптимальная доза сорбционной добавки составляет 5–10 % от массы портландцемента, которая не вызывает существенного снижения прочности цементного компаунда по сравнению с компаундом без использования добавки и одновременно обеспечивает высокий уровень иммобилизации ¹³⁷Cs. Полученные результаты исследований свидетельствуют о перспективности использования разработанных алюмосиликатных сорбентов в качестве сорбционной добавки для иммобилизации ¹³⁷Cs при обращении с жидкими радиоактивными отходами.

Ключевые слова: алюмосиликатные сорбенты, бентонитовая глина, иллит, жидкие радиоактивные отходы, иммобилизация, цементный компаунд, скорость выщелачивания, механическая прочность

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Леонтьева Татьяна Геннадьевна** – старший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны. E-mail: t.leontieva@tut.by; *Москальчук Леонид Николаевич* – доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси; профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, факультет технологии органических веществ Белорусского государственного технологического университета. E-mail: leonmosk@tut.by; *Баклай Анатолий Анатольевич* – старший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: a.baklay@tut.by; *Маковская Наталья Александровна* – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией радиохимических ис-

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

следований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by

Вклад авторов: *Леонтьева Татьяна Геннадьевна* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, анализ и обобщение литературных данных, планирование исследований по изучению скорости выщелачивания ^{137}Cs из цементных компаундов, пробоподготовка образцов алюмосиликатных сорбентов и цементных компаундов, проведение инструментальных исследований по изучению процессов сорбции радионуклида ^{137}Cs , обобщение и интерпретация результатов исследования, формулировка выводов, подготовка и оформление текста рукописи, работа с графическим материалом, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи; *Москальчук Леонид Николаевич* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, обобщение и интерпретация результатов исследования, формулировка выводов, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи; *Баклай Анатолий Анатольевич* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), создание модели исследования, планирование исследований по изучению сорбции ^{137}Cs алюмосиликатными сорбентами, проведение инструментальных исследований и радиохимических измерений удельной активности растворов ^{137}Cs , применение статистических и математических методов для анализа результатов исследования, обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования; *Маковская Наталья Александровна* – сбор литературных данных, проведение сравнительного анализа, формулировка выводов, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Анализ влияния алюмосиликатных сорбентов на иммобилизацию ^{137}Cs в цементном компаунде и его механическую прочность / Т. Г. Леонтьева [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 1. – С. 76–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-76-88>

Поступила в редакцию: 21.06.2023

Утверждена к публикации: 22.02.2024

Подписана в печать: 15.03.2024

Original article

Tatiana G. Leontieva^{1*}, Leonid N. Maskalchuk^{1,2}, Anatoly A. Baklay¹, Natalia A. Makovskaya¹

¹The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny National of the Academy of Sciences of Belarus,
PO box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus

²Belarusian State Technological University, 13a, Sverdlov Str., 220006, Minsk, Republic of Belarus

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF THE ALUMINOSILICATE SORBENTS ON THE IMMOBILIZATION OF ^{137}Cs IN THE CEMENT COMPOUND AND ITS MECHANICAL STRENGTH

Abstract. Studies have been carried out to determine the main parameters characterizing the quality of cement compounds: ^{137}Cs leaching rate and mechanical strength. As sorption additives, aluminosilicate sorbents were used, obtained from clay-salt slimes of JSC “Belaruskali” as a result of water and acid-water treatment to increase the content of the clay mineral illite, which is the main component in the composition of aluminosilicate sorbents. Model aqueous solutions of ^{137}Cs were used as liquid radioactive waste, including those with a NaNO_3 content of 150 g/dm^3 . It has been established that the use of aluminosilicate sorbents makes it possible to reduce the rate of ^{137}Cs leaching from cement compounds, which indicates a higher degree of ^{137}Cs fixation in the matrix material compared to samples of cement compounds without sorption additives. The efficiency of the aluminosilicate sorbent for ^{137}Cs immobilization during cementation of a model solution of liquid radioactive waste is 3 times higher than the well-known and widely used sorption additive (bentonite clay from the 10th Khutor deposit, Khakassia, Russia). Determination of the mechanical strength of samples of cement compounds with the addition of 5–15 % aluminosilicate sorbents showed that this indicator is 8–9 times higher than the standard value (4.9 MPa). The optimal dose of a sorption additive is 5–10 wt.% of the weight of Portland cement, which does not cause a significant decrease in the strength of the cement compound compared to a compound without the use of an additive and, at the same time, will provide a high level of ^{137}Cs immobilization. The obtained research results indicate the prospects of using the developed aluminosilicate sorbents as a sorption additive for ^{137}Cs immobilization when handling liquid radioactive waste.

Keywords: aluminosilicate sorbents, illite, bentonite clay, liquid radioactive waste, immobilization, cement compound, leaching rate, compressive strength

Conflict of interest: the authors declare that there is no conflict of interest.

Information about the authors: *Tatiana G. Leontieva** – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: t.leontieva@tut.by; *Leonid N. Maskalchuk* – Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of the Laboratory of Radiochemical Research of Natural Environments and Expertise of Radioactive Materials at The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus; Professor of the Department of Life Safety, Faculty of Technology of Organic Substances at Belarusian State Technological University. E-mail: leonmosk@tut.by; *Anatoly A. Baklay* – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at The Joint

Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: a.baklay@tut.by; *Natalia A. Makovskaya* – Cand. Sci (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by

Contribution of the authors: *Tatiana G. Leontieva* – substantiation of the concept of the study (formulation of the idea, research goals and objectives), development of the research methodology, formulation of conclusions, planning research to study the rate of ^{137}Cs leaching from cement compounds, analysis and generalization of literature data, preparation of samples of aluminosilicate sorbents and cement compounds, conducting instrumental studies to study the processes of sorption of ^{137}Cs radionuclide, generalization and interpretation of research results, formulation of conclusions, writing and design of the text of the manuscript, work with graphic material, critical revision of the text of the manuscript (including stages before publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript; *Leonid N. Maskalchuk* – substantiation of the concept of the study (formulation of the idea, research goals and objectives), development of the research methodology, generalization and interpretation the results of research, formulation of conclusions, critical revision of the text of the manuscript (including stages before publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript; *Anatoly A. Baklay* – substantiation of the research concept (formulation of the idea, research goals and objectives), creation of a research model, planning research to study the sorption of ^{137}Cs by aluminosilicate sorbents, instrumental studies and radiochemical measurements of the specific activity of ^{137}Cs solutions, the use of statistical, mathematical methods for data analysis, generalization of the results of the research, interpretation of the results of research; *Natalia A. Makovskaya* – collection of literature data, comparative analysis, formulation of conclusions, critical revision of the text of the manuscript (including stages before the publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript.

For citation: Leontieva T. G., Maskalchuk L. N., Baklay A. A., Makovskaya N. A. Analysis of the influence of the aluminosilicate sorbents on the immobilization of ^{137}Cs in the cement compound and its mechanical strength. *Vestsi Natsyyanal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 1, pp. 76–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-1-76-88>

Received: 21.06.2023

Approved for publication: 22.02.2024

Signed to the press: 15.03.2024

Введение. Известно, что при эксплуатации атомной электростанции (АЭС) образуются значительные объемы жидких радиоактивных отходов (ЖРО) различного радиохимического состава [1–3]. Наиболее проблемными среди ЖРО являются высокосолевые кубовые остатки АЭС, содержащие 500–600 г/дм³ солей. В настоящее время на российских АЭС с реакторами типа ВВЭР хранится значительное количество таких ЖРО, 75 % из которых составляют соединения бора и 20–25 % – нитрат натрия. Основным дозообразующим радионуклидом данного вида ЖРО является цезий (период полураспада $T_{1/2} = 30,1$ лет).

Кондиционирование указанных отходов является одной из важных задач для дальнейшего развития атомной энергетики. ЖРО должны быть переведены в стабильную физико-химическую форму для максимального исключения возможности миграции радионуклидов из материала матрицы в окружающую среду [3]. Отверждение является широко применяемым методом обращения с радиоактивными отходами, а цемент – наиболее часто используемым материалом для иммобилизации радионуклидов благодаря таким своим преимуществам, как высокая механическая прочность застывшей формы отходов, простота эксплуатации и низкая стоимость [3, 4]. В последние десятилетия предприняты значительные усилия по совершенствованию технологии цементирования для снижения выщелачивания радионуклидов, включая улучшение механических свойств и повышение долговечности цементного компаунда. В частности, разработаны специальные цементы на основе портландцемента для отверждения радиоактивных отходов, предложены альтернативные цементирующие материалы: алюминат кальция, сульфоалюминат кальция, цементы на основе фосфата магния и геополимеры [5, 6].

В [4] представлена информация по различным типам цементов, обобщены основные параметры, используемые для характеристики отвержденных форм отходов: емкость упаковки, прочность на сжатие, прочность на растяжение и устойчивость к выщелачиванию, а также проанализированы меры, принятые для улучшения этих характеристик. Установлено, что основными механизмами иммобилизации радионуклидов в цементах являются их химическая фиксация в нерастворимой форме, физическая адсорбция и фиксация в матрице. При отверждении ЖРО двухкомпонентный состав цементного компаунда (ЦК) представляет собой смесь из ЖРО и портландцемента при соотношении 1 : (1,3–2,0), что обеспечивает получение монолитных блоков с прочностью при сжатии не менее 4,9 МПа на 28-е сутки отверждения [3].

В Республике Беларусь введена в эксплуатацию Белорусская АЭС, в результате функционирования которой происходит образование жидких радиоактивных отходов. Основным методом их кондиционирования является цементирование. При этом определяющим документом, регламентирующим требования к цементованным радиоактивным отходам (РАО), является российский стандарт ГОСТ Р 51833-2002 «Отходы радиоактивные цементованные. Общие технические требования». Согласно данному документу одними из основных параметров, характеризующими качество цементных компаундов, определены скорость выщелачивания ^{137}Cs , которая не должна превышать $1 \cdot 10^{-3}$ г/см²·сут на 28-е сутки эксперимента, и механическая прочность (предел прочности при сжатии), которая должна быть не менее 4,9 МПа. Недостаток метода цементования ЖРО – высокая выщелачиваемость ^{137}Cs , для снижения которой используют селективные сорбенты [7–9], обеспечивающие высокий уровень фиксации ^{137}Cs при формировании ЦК.

Использование селективных сорбентов при обращении с ЖРО – различных алюмосиликатов (бентонит, вермикулит, клиноптилолит и др.) и ферроцианидов переходных металлов – служит наиболее известным и эффективным способом иммобилизации радионуклидов [7–12]. По данным [10], приготовленный композиционный сорбент на основе клиноптилолита и гексацианоферрата меди и калия показал высокую адсорбционную способность в отношении ^{137}Cs в диапазоне pH 7–8, а кислая среда и щелочная привели к ее снижению. На практике наиболее широко используемым природным материалом в качестве минеральной добавки в цементную матрицу является бентонит, обладающий высокими сорбционными свойствами (коэффициент распределения ^{137}Cs составляет 10^3 – 10^4 см³/г) [9, 11, 12]. В [13] установлено, что на фиксацию цезия бентонитом в растворах с высокой ионной силой влияют конкурирующие ионы Mg, Ca, K и Na, тогда как минеральные и физико-химические изменения монтмориллонита в щелочных и солевых растворах не оказывают существенного влияния на способность бентонита сорбировать цезий.

При проведении исследования по оценке влияния бентонита в Ca-, Na- и Mg-форме на прочность и непроницаемость бетона было установлено, что с увеличением содержания бентонита значительно повышается прочность и непроницаемость ЦК [14]. Данные, приведенные в [15], показывают, что скорость выщелачивания радионуклидов ^{137}Cs и ^{60}Co из ЦК может быть снижена при добавлении 5 мас.% бентонита и цеолита в цемент, не вызывая недопустимых потерь механической прочности. При этом сорбция ^{137}Cs предпочтительно происходит на природном цеолите (клиноптилолит), а сорбция ^{60}Co – на природном бентоните. Также установлено, что бентонит и клиноптилолит являются эффективными сорбционными материалами в отношении радионуклидов цезия и стронция соответственно [16]. Скорость выщелачивания цезия при использовании сорбционных добавок в количестве 3–10 % от массы цементного материала составляет 10^{-4} – 10^{-5} г/(см²·сут) при сохранении высокой механической прочности ЦК [3, 8]. Согласно данным [17], в качестве сорбционной добавки при цементовании кубовых остатков АЭС можно использовать природные глины, так как они являются селективными сорбентами в отношении ^{137}Cs . При этом селективность глин в отношении ^{137}Cs зависит как от содержания в них глинистых минералов монтмориллонита и иллита, так и от их структурных особенностей [18, 19]. Использование природной глины и бентонита приводит к значительному снижению выщелачивания радиоцезия из отвержденных цементных компаундов, а наиболее эффективной сорбирующей добавкой является природная глина [9, 17, 20].

Результаты работы [12] показали, что природные алюмосиликатные сорбенты, цеолиты, фосфат циркония и ферроцианидные сорбенты способны эффективно удалять ^{137}Cs из малосолевых растворов. Сорбент на основе оксигидрата марганца (III, IV) проявлял наибольшую селективность по отношению к стронцию. Установлена корреляция между кристаллической и пористой структурой сорбентов и селективностью по отношению к радионуклидам цезия и стронция. Знание сорбционных свойств различных материалов позволяет проводить целенаправленный выбор наиболее эффективных сорбентов для очистки ЖРО от радионуклидов.

Поскольку одной из функций ЦК является надежная фиксация радионуклидов в составе матрицы, существует три основных подхода для ее повышения [16]:

- 1) снижение концентрации солей в отвержденных ЖРО;

2) предварительная обработка раствора сорбционными и осадительными методами с целью фиксации радионуклидов в твердой фазе;

3) включение сорбирующих и гидроизолирующих добавок в состав сухой смеси цементно-го компаунда.

Согласно данным [4] при изучении технологий цементирования ЖРО актуальным является:

– проведение работ по определению характеризующих цементируемые формы отходов показателей, таких как механическая прочность и стойкость к выщелачиванию, с целью совершенствования технологии твердения цемента;

– поиск добавок для улучшения технологии затвердевания цемента и повышения прочности на сжатие, а также снижения скорости выщелачивания радионуклидов;

– установление механизмов цементации отходов с различными компонентами в составе ЦК с целью понимания протекающих процессов и фазовых продуктов и разработки эффективных рецептур таких компаундов.

Для снижения уровня выщелачивания радионуклидов из ЦК следует использовать сорбенты, которые обладают высокими сорбционными и фиксирующими свойствами по отношению к радионуклиду ^{137}Cs . Актуальность поиска новых эффективных сорбентов для связывания ^{137}Cs обусловлена тем, что при цементировании ЖРО стремятся к минимизации содержания сорбционной добавки, чтобы избежать увеличения затрат и объема конечных ЦК, подлежащих захоронению. Также весьма значимым фактором является отсутствие существенного влияния сорбционной добавки на механическую прочность компаундов.

В качестве сорбционной добавки в ЦК предлагается использовать алюмосиликатные сорбенты, полученные из глинисто-солевых шламов – отходов калийного производства ОАО «Беларуськалий» [21]. Известно [21, 22], что основным глинистым минералом в составе глинисто-солевого шлама является иллит, который характеризуется эффективными сорбционными показателями в отношении радионуклидов цезия и стронция. Исследования с использованием алюмосиликатных сорбентов в качестве сорбционной добавки в ЦК для кондиционирования жидких радиоактивных отходов проводятся впервые.

Цель работы – оценка эффективности использования алюмосиликатных сорбентов для иммобилизации ^{137}Cs в цементном компаунде при обращении с жидкими радиоактивными отходами и их влияние на механическую прочность компаунда.

Материалы и методы исследований. Для проведения исследований использовались образцы алюмосиликатных сорбентов на основе глинисто-солевых шламов, характеристика которых приведена в табл. 1. Алюмосиликатные сорбенты получали из глинисто-солевых шламов путем водной обработки, снижающей содержание водорастворимых солей, кислотно-водной обработки с использованием 0,1М HCl, позволяющей разрушить карбонатные минералы [21], и обогащения для выделения фракции с размером частиц менее 2 мкм седиментационным методом, в результате чего происходило повышение содержания основного глинистого минерала иллита [23].

Таблица 1. Характеристика алюмосиликатных сорбентов

Таблица 1. Characteristics of aluminosilicate sorbents

Наименование сорбента	Шифр образца	Способ получения	Содержание основных минералов, %				Удельная поверхность, м ² /г	рН
			иллит	кальцит и доломит	калевый полевой шпат	кварц		
Алюмосиликатный сорбент	АС	Водная обработка	51,1	18,4	21,8	4,9	29,0	7,9
Алюмосиликатный сорбент модифицированный	АС-м	Кислотно-водная обработка	65,0	–	27,8	6,2	39,0	6,7
Алюмосиликатный иллитсодержащий сорбент	АС-и	Обогащение	89,2	–	7,2	0,8	58,0	7,9

Экспериментальные исследования по определению скорости выщелачивания ^{137}Cs из ЦК проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 29 114-91 «Отходы радиоактивные. Метод измерения химической устойчивости отвержденных радиоактивных отходов посредством длительного выщелачивания». Метод заключается в определении химической устойчивости отвержденных радиоактивных отходов и их имитаторов посредством выщелачивания радионуклидов и макрокомпонентов при длительном контакте с водой и водными растворами.

В состав цементного компаунда включались следующие компоненты: портландцемент марки ЦЕМ I класса прочности 42,5 Н (ГОСТ 31 108-2020) и сорбционная добавка в массовом соотношении 85 : 15. В качестве ЖРО использовался модельный водный раствор ^{137}Cs с активностью $4 \cdot 10^5$ Бк/дм³. Соотношение массы модельного раствора ^{137}Cs к массе портландцемента и сорбционной добавки составило 0,6. В результате получены следующие образцы цементных компаундов: ЦК0 – без сорбционной добавки, ЦК1 – сорбционная добавка АС и ЦК2 – сорбционная добавка АС-м. Данные образцы оставались для отверждения на 28 сут. В качестве выщелачивающей среды использовалась дистиллированная вода и модельный водный раствор, имитирующий грунтовые воды.

В связи с тем что основным механизмом сорбции ^{137}Cs является ионный обмен, наибольшее влияние на данный процесс могут оказывать катионы K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , присутствующие в природных и грунтовых водах. Поэтому в качестве контактного раствора при определении скорости выщелачивания ^{137}Cs из ЦК использовали модельный водный раствор, содержащий катионы K^+ , Ca^{2+} , Na^+ и Mg^{2+} при концентрациях 1,36; 49,46; 12,72 и 21,22 мг/дм³ соответственно. Расчет скорости выщелачивания проводили по формуле

$$R_n^i = \frac{a_n^i}{A_n^0 \cdot S \cdot t_n}, \quad (1)$$

где a_n^i – активность радионуклида (n), выщелоченного за интервал времени (i), Бк; A_n^0 – удельная активность радионуклида в исходном образце, Бк/г; S – площадь открытой геометрической поверхности образца, см²; t_n – продолжительность периода выщелачивания, сут.

Определение механической прочности ЦК проводилось согласно требованиям ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии» в аккредитованном испытательном центре Государственного предприятия «Институт НИИСМ». Для приготовления ЦК использовался портландцемент марки ЦЕМ I класса прочности 42,5 Н и алюмосиликатные сорбенты АС и АС-м в количестве 5, 10 и 15 % от массы портландцемента, которые перемешивались до однородного состояния. Соотношение массы воды к массе портландцемента и сорбционной добавки составляло 0,4, время твердения – 28 сут.

Известно [1, 20], что основным компонентом химического состава ЖРО АЭС является нитрат натрия (NaNO_3). Поэтому для оценки его влияния на сорбционные свойства алюмосиликатного сорбента (АС-и), полученного путем обогащения и повышения в его составе глинистого минерала иллита, использовали модельные растворы с концентрацией NaNO_3 от 100 до 250 г/дм³ (от 1,2 до 2,9 моль/дм³). Исследование сорбции ^{137}Cs образцом АС-и (фракция < 2 мкм) проводили в условиях ограниченного объема при температуре 20 ± 2 °С. Навески образца АС-и массой 0,1 г помещали в центрифужные пробирки и добавляли в каждую по 10 см³ раствора NaNO_3 с радиоактивной меткой ^{137}Cs . Удельная активность нитратных растворов ^{137}Cs составляла $1,6 \cdot 10^6$ Бк/дм³. Через заданные промежутки времени (7 и 28 сут) жидкую и твердую фазы разделяли центрифугированием (10 000 об/мин, 10 мин). В полученном фильтрате определяли удельную активность ^{137}Cs прямым спектрометрическим методом по линии $E\gamma = 662$ кэВ с использованием универсального спектрометрического комплекса РУС-91М. Степень сорбции радионуклида ^{137}Cs (F_s , %) и коэффициент распределения (K_d , дм³/кг) рассчитывали по формулам:

$$F_s = \frac{A_0 - A_p}{A_0} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \cdot \frac{V}{m}, \quad (3)$$

где A_0 и A_p – исходная и равновесная активности радионуклидов ^{137}Cs в растворе соответственно, Бк/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса образца, кг.

После исследования сорбции ^{137}Cs образцом АС-и проводили эксперимент по изучению выщелачивания радионуклида ^{137}Cs различными по составу растворами: дистиллированная вода (H_2O), 1М раствор ацетата аммония ($\text{CH}_3\text{COONH}_4$), 1М раствор соляной кислоты (HCl). Данный метод позволяет выделить условно подвижные формы ^{137}Cs (водорастворимая и обменная) и неподвижные или фиксированные формы ^{137}Cs (кислоторастворимая и остаточная).

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 51 883-2002 допустимая механическая прочность цементного компаунда составляет не менее 4,9 МПа, что определяет предельную концентрацию солей в ЖРО при их цементировании. Согласно данным работ [24, 25] предельная концентрация NaNO_3 , обеспечивающая нормативную прочность цементного компаунда, составляет 150–200 г/дм³, выше которой происходит резкое падение прочности. В связи с этим при исследовании скорости выщелачивания ^{137}Cs из цементных компаундов в качестве модельного раствора, имитирующего ЖРО нитратного состава, использовался водный раствор NaNO_3 с содержанием 150 г/дм³, в который вносили радиоактивную метку ^{137}Cs . Удельная активность модельного раствора ^{137}Cs составляла $4,1 \cdot 10^6$ Бк/дм³. В качестве основных материалов при цементировании ЖРО использовали портландцемент марки ЦЕМ I 42,5 Н, модельный раствор ЖРО и алюмосиликатный сорбент (АС-и). Отношение массы модельного раствора ^{137}Cs к массе портландцемента и сорбционной добавки составляло 0,6. Масса АС-и равна 5 и 10 % от массы портландцемента.

Образцы ЦК получали путем соединения жидкой (модельный раствор ^{137}Cs с содержанием NaNO_3 150 г/л) и твердой (смесь портландцемента и сорбционной добавки) фаз в определенном отношении с последующим их перемешиванием до образования однородного цементного раствора. Затем полученный раствор заливали в разборные формы с размером ячейки $2 \times 2 \times 2$ см и выдерживали 28 сут до полного отверждения. Скорость выщелачивания ^{137}Cs из ЦК рассчитывали по формуле (1). В качестве выщелачивающей среды использовали дистиллированную воду.

Для сравнительного анализа в исследованиях использовались образцы алюмосиликатного сорбента АС-и и бентонитовой глины (БГ) месторождения «10-й Хутор» (Хакасия, Россия), предоставленной ООО «Компания БЕНТОНИТ» (г. Москва, Россия) со следующими физико-химическими характеристиками: массовая доля монтмориллонита – 58,8 %, содержание глинистых минералов – 70,5 %, емкость катионного обмена – 45,6 мг-экв/100 г. Данный материал используется на АЭС в основном в качестве сорбционной добавки для иммобилизации ^{137}Cs при цементировании ЖРО.

Результаты исследований и их обсуждение. Одним из основных факторов, определяющих надежность длительного хранения и захоронения РАО, является скорость выщелачивания ^{137}Cs из ЦК, которая, согласно требованиям ГОСТ Р 51 883-2002, не должна превышать 10^{-3} г/(см²·сут). За скорость выщелачивания, сравниваемую с данным показателем, принимали полученную на 28-е сутки испытаний, то есть выход ^{137}Cs , обусловленный диффузией, а не вымыванием с поверхности образцов компаундов. Результаты эксперимента по выщелачиванию ^{137}Cs из образцов ЦК при использовании в качестве контактного раствора дистиллированной воды представлены в табл. 2.

Таблица 2. Скорость выщелачивания ^{137}Cs из цементных компаундов в дистиллированной воде

Таблица 2. Leaching rate of ^{137}Cs from cement compounds in distilled water

Шифр ЦК	Сорбционная добавка	Скорость выщелачивания, г/(см ² ·сут), на сутки					
		на 1-е	на 3-и	на 7-е	на 14-е	на 21-е	на 28-е
ЦК0	–	$16 \cdot 10^{-2}$	$5,2 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-3}$
ЦК1	АС	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$5,7 \cdot 10^{-4}$
ЦК2	АС-м	$2,5 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$3,1 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$

Согласно полученным данным, с течением времени скорость выщелачивания ^{137}Cs для образцов ЦК с сорбционной добавкой и без нее снижается. Однако на 28-е сутки эксперимента нормативному требованию соответствуют только значения для образцов ЦК1 и ЦК2, содержащих добавку алюмосиликатных сорбентов.

При использовании в качестве контактного раствора модельного водного раствора, содержащего катионы K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , получены результаты, представленные в табл. 3.

Таблица 3. Скорость выщелачивания ^{137}Cs из цементных компаундов в модельном водном растворе

Таблица 3. Leaching rate of ^{137}Cs from cement compounds in a model aqueous solution

Шифр ЦК	Сорбционная добавка	Скорость выщелачивания, г/(см ² ·сут), на сутки					
		на 1-е	на 3-и	на 7-е	на 14-е	на 21-е	на 28-е
ЦК0	–	0,1	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
ЦК1	АС	$7,6 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$8,5 \cdot 10^{-4}$	$9,0 \cdot 10^{-4}$
ЦК2	АС-м	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$7,7 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$

Из табл. 3 видно, что с течением времени скорость выщелачивания ^{137}Cs для образцов ЦК с сорбционной добавкой и без ее использования снижается. На 28-е сутки эксперимента нормативному требованию соответствуют только значения для образцов ЦК1 и ЦК2, которые содержат добавку алюмосиликатных сорбентов. Присутствие в водном растворе катионов K^+ , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} оказывает влияние на скорость выщелачивания ^{137}Cs из ЦК, увеличивая ее по сравнению с дистиллированной водой. В наибольшей степени снижает скорость выщелачивания ^{137}Cs использование модифицированного алюмосиликатного сорбента (АС-м) в образце ЦК2.

Для оценки прочности на сжатие полученных образцов ЦК с добавкой алюмосиликатных сорбентов и ЦК без использования добавки по окончании срока полного отверждения образцов (28-е сутки) проведены испытания, результаты которых приведены в табл. 4.

Таблица 4. Прочностные характеристики полученных цементных компаундов

Таблица 4. Strength characteristics of the obtained cement compounds

Наименование показателя	Без добавки	АС			АС-м		
		5	10	15	5	10	15
Содержание добавки, мас.%	–	5	10	15	5	10	15
Предел прочности при сжатии, МПа	53,7	44,5	44,1	40,8	45,6	45,2	37,9

Полученные результаты показывают, что наибольшей механической прочностью обладает образец без сорбционной добавки, а присутствие в ЦК алюмосиликатных сорбентов приводит к ее снижению, но не менее нормативного значения (4,9 МПа). Увеличение доли сорбционной добавки в составе ЦК приводит к снижению предела прочности на сжатие, поэтому ее содержание в компаунде не должно превышать 5–10 % от массы портландцемента.

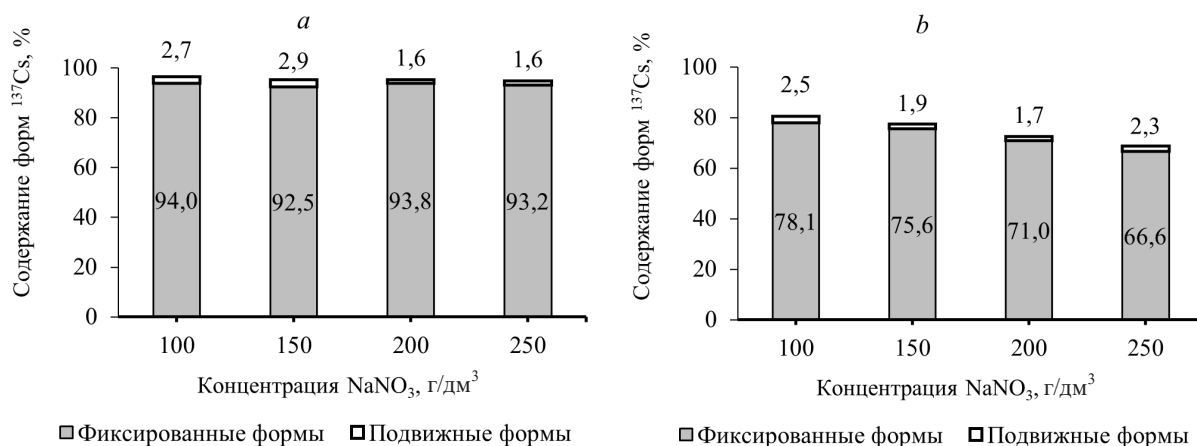
Для оценки влияния основного компонента ЖРО АЭС (нитрата натрия) на сорбционные свойства алюмосиликатного сорбента (АС-и) с высоким содержанием иллита и бентонитовой глины использовали модельные растворы с различной концентрацией NaNO_3 . Результаты исследований (табл. 5) показали, что при увеличении концентрации NaNO_3 в растворе степень сорбции ^{137}Cs (F_s , %) образцами АС-и и БГ снижается. В наибольшей степени это наблюдается для образца глины, поскольку значение коэффициента распределения ^{137}Cs (K_d , дм³/кг) в растворе с концентрацией NaNO_3 250 г/дм³ после 28 сут взаимодействия снижается в 51 раз по сравнению с бессолевым раствором. Для образца АС-и K_d ^{137}Cs при тех же условиях снижается в 22 раза.

Полученные результаты показывают, что с увеличением времени взаимодействия раствора ^{137}Cs с образцами АС-и и БГ от 7 до 28 сут степень сорбции ^{137}Cs увеличивается. Установлено, что на сорбцию ^{137}Cs образцом АС-и увеличение содержания в растворе NaNO_3 от 100 до 250 г/дм³ практически не оказывает влияния, то есть степень сорбции ^{137}Cs на 28-е сутки эксперимента снижается незначительно – на 1,9 %. Для БГ такое снижение составляет 11,7 %.

Таблица 5. Характеристика сорбционных свойств алюмосиликатного сорбента и бентонитовой глины в отношении ^{137}Cs Table 5. Characterization of the sorption properties of aluminosilicate sorbent and bentonite clay in relation to ^{137}Cs

Концентрация NaNO_3 , г/дм ³	Алюмосиликатный сорбент (АС-и)				Бентонитовая глина (БГ)			
	F_S ^{137}Cs , %		K_d ^{137}Cs , дм ³ /кг		F_S ^{137}Cs , %		K_d ^{137}Cs , дм ³ /кг	
	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут	7 сут	28 сут
0	98,5	99,7	$7,5 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^4$	98,8	99,1	$8,9 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$
100	95,7	96,7	$2,3 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	74,0	80,6	$2,9 \cdot 10^2$	$4,2 \cdot 10^2$
150	93,9	95,4	$1,6 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	72,4	77,6	$2,7 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^2$
200	94,0	95,5	$1,6 \cdot 10^3$	$2,1 \cdot 10^3$	67,5	72,7	$2,1 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^2$
250	93,6	94,8	$1,5 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$	62,4	68,9	$1,7 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^2$

Содержание фиксированной формы ^{137}Cs повышается при увеличении времени взаимодействия с раствором ^{137}Cs и на 28-е сутки эксперимента практически не зависит от содержания в растворе NaNO_3 (см. рисунок). Для образца АС-и содержание фиксированной формы ^{137}Cs составляет порядка 93–94 %, а для образца БГ происходит снижение содержания фиксированной формы ^{137}Cs от 78,1 до 66,6 % при увеличении содержания NaNO_3 в растворе.



Содержание форм ^{137}Cs в образцах алюмосиликатного и иллитсодержащего сорбента АС-и (а) и бентонитовой глины (б) после 28 сут взаимодействия с раствором ^{137}Cs

The content of ^{137}Cs forms in samples of aluminosilicate illite-containing sorbent AS-i (a) and bentonite clay (b) after 28 days of interaction with a ^{137}Cs solution

В результате проведенных исследований установлено, что механизмы фиксации ^{137}Cs для образцов АС-и и БГ разные. Полученные экспериментальные данные (см. табл. 5 и рисунок) свидетельствуют о том, что фиксация ^{137}Cs в образце алюмосиликатного сорбента происходит в основном на иллите за счет схлопывания слоев кристаллической решетки минерала, а на бентонитовой глине – за счет диффузии ^{137}Cs в глубь кристаллической решетки монтмориллонита.

Для оценки эффективности использования алюмосиликатных сорбентов в качестве сорбционной добавки в цементные компаунды проведен сравнительный анализ результатов выщелачивания ^{137}Cs из ЦК с сорбционными добавками АС-и и БГ, полученных в идентичных условиях. Содержание добавки составляло 5 и 10 % от массы портландцемента. В качестве модельного раствора, имитирующего ЖРО нитратного состава, использовали водный раствор NaNO_3 с содержанием 150 г/дм³. Результаты исследований представлены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6. Скорость выщелачивания ^{137}Cs из цементных компаундов в дистиллированной воде

Table 6. Leaching rate of ^{137}Cs from cement compounds in distilled water

Шифр ЦК	Скорость выщелачивания R , г/(см ² ·сут), на сутки						
	на 1-е	на 3-и	на 7-е	на 10-е	на 14-е	на 21-е	на 28-е
ЦК0	$32 \cdot 10^{-2}$	$5,3 \cdot 10^{-2}$	$6,8 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$7,8 \cdot 10^{-4}$	$5,6 \cdot 10^{-4}$
ЦК1	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$6,3 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-4}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$
ЦК2	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-3}$	$5,3 \cdot 10^{-4}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$
ЦК3	$5,3 \cdot 10^{-3}$	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-4}$	$6,1 \cdot 10^{-4}$
ЦК4	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$6,6 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-4}$	$6,9 \cdot 10^{-4}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$

Видно, что внесение в ЦК сорбционной добавки в количестве 5–10 % от массы портландцемента приводит к снижению скорости выщелачивания ^{137}Cs по сравнению с компаундом без сорбционной добавки, и особенно на протяжении первых 7 сут эксперимента. На 28-е сутки эксперимента скорость выщелачивания ^{137}Cs из образцов ЦК1 и ЦК2 с добавкой АС-и ниже в 3–4 раза по сравнению с образцом ЦК0 без использования добавки. Для образца ЦК3 с 5%-ной добавкой БГ скорость выщелачивания ^{137}Cs сопоставима с образцом ЦК0, а для образца ЦК4 с 10%-ной добавкой БГ она ниже в 1,4 раза по сравнению с образцом ЦК0.

Таким образом, на 28-е сутки эксперимента все образцы цементных компаундов удовлетворяют нормативному требованию по скорости выщелачивания (не более 10^{-3} г/(см²·сут)). Наибольшую способность фиксировать ^{137}Cs показал образец ЦК2 с содержанием алюмосиликатного сорбента (АС-и) 10 мас.%. Эффективность алюмосиликатного сорбента как добавки в цементную матрицу в 3 раза выше, чем бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор» (Хакасия, Россия). Использование алюмосиликатного сорбента в качестве добавки в количестве 10 % от массы портландцемента позволяет получить образцы ЦК, соответствующие требованиям ГОСТ Р 51883-2002 по показателям «скорость выщелачивания ^{137}Cs » и «механическая прочность».

Заключение. Результаты исследований по определению скорости выщелачивания ^{137}Cs из ЦК показали, что использование алюмосиликатных сорбентов АС и АС-м приводит к снижению скорости выщелачивания ^{137}Cs из них, что свидетельствует о более высокой степени фиксации радиоцезия в цементной матрице по сравнению с образцами ЦК без сорбционных добавок. Предпочтительно использовать АС-м, который снижает скорость выщелачивания ^{137}Cs больше, чем АС, что связано с повышенным содержанием основного глинистого минерала иллита, обладающего высокой сорбирующей способностью в отношении ^{137}Cs .

Определение предела прочности на сжатие образцов ЦК с добавкой 5–15 % алюмосиликатных сорбентов (АС и АС-м) показало, что данный показатель в 8–9 раз выше нормативного значения (4,9 МПа). Оптимальная доза сорбционной добавки составляет 5–10 % от массы портландцемента, которая не вызывает существенного снижения прочности компаунда по сравнению с компаундом без использования добавки и, одновременно, обеспечивает высокий уровень иммобилизации ^{137}Cs .

При исследовании влияния нитрата натрия концентрацией 150 г/дм³ в составе ЦК на скорость выщелачивания ^{137}Cs установлено, что использование АС-и и БГ в количестве 10 % от массы портландцемента приводит к ее снижению по сравнению с компаундом без сорбционной добавки. На 28-е сутки эксперимента скорость выщелачивания ^{137}Cs из образцов ЦК с добавкой АС-и ниже в 3–4 раза по сравнению с образцом компаунда без использования добавки. Эффективность сорбента АС-и для связывания ^{137}Cs при цементировании модельного раствора ЖРО в 3 раза выше, по сравнению с известной сорбционной добавкой (бентонитовая глина месторождения «10-й Хутор», Хакасия, Россия).

Результаты проведенных исследований показали, что алюмосиликатные сорбенты могут быть использованы в качестве эффективной сорбционной добавки для безопасного обращения с низко- и среднеактивными жидкими радиоактивными отходами.

Список использованных источников

1. Рябчиков, Б. Е. Очистка жидких радиоактивных отходов / Б. Е. Рябчиков. – М.: ДеЛи принт, 2008. – 516 с.
2. Изучение возможности включения высокосолевого жидких радиоактивных отходов в матрицы на основе нано-размерного кремнезема и цеолитов / О. А. Кононенко [и др.] // Вопросы радиационной безопасности. – 2014. – № 4. – С. 3–10.
3. Gorbunova, O. A. Cementation of liquid radioactive waste with high content of borate salts / O. A. Gorbunova // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2015. – Vol. 304, № 1. – P. 361–370. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3886-3>
4. Li, J. Solidification of radioactive wastes by cement-based materials / J. Li, C. Lei, W. Jianlong // Progress in Nuclear Energy. – 2021. – Vol. 141. – Art. ID 103957. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103957>
5. Ojovan, M. I. An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation / M. I. Ojovan, W. E. Lee, S. N. Kalmykov. – Amsterdam: Elsevier, 2019. – 512 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03752-7>
6. Kononenko, O. A. Monolith matrix of calcium aluminate and gypsum—promising material for incorporating NaNO₃-containing liquid radioactive waste / O. A. Kononenko, E. A. Kozlitsin // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2023. – Vol. 332. – P. 4065–4073. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-09086-x>
7. Козлов, П. А. Цементирование как метод иммобилизации радиоактивных отходов / П. В. Козлов, О. А. Горбунова. – Озерск; М.: ПО «Маяк», 2011. – 143 с.
8. Утилизация пульпы ферроцианидных сорбентов методом цементирования / О. А. Кононенко [и др.] // Вопр. радиац. безопасности. – 2011. – № 3. – С. 13–19.
9. Sorption of Cs, Sr, U and Pu radionuclides on natural and modified clays / V. V. Milyutin [et al.] // Radiochemistry. – 2012. – Vol. 54, № 1. – С. 75–78. <https://doi.org/10.1134/S1066362212010110>
10. Selective separation of cesium from radioactive liquid waste by potassium copper hexacyanoferrate (II)-clinoptilolite composite / Song-Hyok Ri [et al.] // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2023. – Vol. 332. – P. 2329–2337. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08821-8>
11. Милютин, В. В. Современные сорбционные материалы для очистки жидких радиоактивных отходов от радионуклидов цезия и стронция / В. В. Милютин, Н. А. Некрасова, В. О. Каптаков // Радиоактив. отходы. – 2020. – № 4 (13). – С. 80–89. <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-4-80-89>
12. Adsorption techniques for decontaminating liquid radioactive waste and radionuclide-contaminated natural water / V. V. Milyutin [et al.] // Adsorption. – 2023. – Vol. 29. – P. 323–334. <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00407-w>
13. Bentonite alteration and retention of cesium and iodide ions by Ca-bentonite in alkaline and saline solutions / Ja-Young Goo [et al.] // Appl. Clay Sci. – 2023. – Vol. 245. – Art. ID 107141. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107141>
14. Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars / X Liu Mengliang [et al.] // Constr. Build. Mater. – 2020. – Vol. 241. – Art. ID 118015. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118015>
15. Plecas, I. Influence of natural sorbents on the immobilization of spent ion exchange resins in cement / I. Plecas, S. Dimović // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2006. – Vol. 269, № 1. – P. 181–185. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-0248-9>
16. Козлов, П. В. Разработка технологии иммобилизации жидких соледержащих среднеактивных отходов в цементную матрицу с последующим хранением компаунда в отсеках большого объема: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11, 05.17.02 / П. В. Козлов. – СПб., 2009. – 163 л.
17. Влияние добавки глины на свойства цементных компаундов, используемых для локализации радиоактивных отходов / Г. А. Быховская [и др.] // Атом. энергия. – 1995. – Т. 79, вып. 1. – С. 23–26.
18. Коноплева, И. В. Селективная сорбция радиоцезия сорбентами на основе природных глин / И. В. Коноплева // Сорбцион. и хроматограф. процессы. – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 446–456.
19. Adsorption of Ba and ²²⁶Ra on illite: A comparative experimental and modelling study / M. Marques Fernandes [et al.] // Appl. Geochem. – 2023. – Vol. 159. – Art. ID 105815. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105815>
20. Кононенко, О. А. Включение кубовых остатков АЭС в матрицы на основе портландцемента и кремнеземистых добавок / О. А. Кононенко, В. М. Гелис, В. В. Милютин // Атом. энергия. – 2010. – Т. 109, вып. 4. – С. 222–227.
21. Aluminosilicate sorbents based on clay-calc slims JSC “Belaruskali” for sorption of cesium and strontium radionuclides / L. N. Maskalchuk [et al.] // Radiochemistry. – 2020. – Vol. 62, № 3. – P. 381–386. <https://doi.org/10.1134/S1066362220030108>
22. Леонтьева, Т. Г. Перспективы использования глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» для очистки водных сред и экосистем от радиоцезия / Т. Г. Леонтьева, Л. Н. Москальчук, А. А. Баклай // Труды БГТУ. Сер. 3, Химия и технология неорган. в-в. – 2016. – № 3. – С. 74–80.
23. Сорбция ¹³⁷Cs⁺ из водных сред иллитсодержащим сорбентом, полученным из глинисто-солевых шламов ОАО «Беларуськалий» / А. А. Баклай [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. – 2020. – № 4. – С. 366–371.
24. Лебедев, В. А. Анализ кубовых остатков радиоактивных отходов и разработка матричных смесей для иммобилизации в компаунд на основе наномодифицированных минеральных вяжущих / В. А. Лебедев, В. М. Пискунов // Зап. Горн. ин-та. – 2013. – Т. 203. – С. 55–58.
25. Обеспечение соответствия цементированных РАО в контейнерах НЗК критериям приемлемости для захоронения / В. П. Поваров [и др.] // АНРИ (Аппаратура и новости радиационных измерений). – 2022. – № 1 (108). – С. 45–55. <https://doi.org/10.37414/2075-1338-2022-108-1-45-55>

References

1. Ryabchikov B. E. *Purification of Liquid Radioactive Waste*. Moscow, DeLi print Publ., 2008. 516 p. (in Russian).
2. Kononenko O. A., Aliev A. D., Puryaeva T. P., Kozlitin E. A., Gelis V. M., Milyutin V. V. Study of the possibility of incorporating high-salt liquid radioactive waste into matrices based on nanosized silica and zeolites. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti* [Issues of Radiation Safety], 2014, no. 4, pp. 3–10 (in Russian).
3. Gorbunova O. A. Cementation of liquid radioactive waste with high content of borate salts. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015, vol. 304, no. 1, pp. 361–370. <https://doi.org/10.1007/s10967-014-3886-3>
4. Li Junfeng, Chen Lei, Wang Jianlong. Solidification of radioactive wastes by cement-based materials. *Progress in Nuclear Energy*, 2021, vol. 141, art. ID 103957. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103957>
5. Ojovan M. I., Lee W. E., Kalmykov S. N. *An Introduction to Nuclear Waste Immobilisation*. Amsterdam, Elsevier, 2019. 512 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03752-7>
6. Kononenko O. A., Kozlitin E. A. Monolith matrix of calcium aluminate and gypsum—promising material for incorporating NaNO_3 -containing liquid radioactive waste. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2023, vol. 332, pp. 4065–4073. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-09086-x>
7. Kozlov P. V., Gorbunova O. A. *Cementing As a Method of Radioactive Waste Immobilization*. Ozersk, Moscow, PO “Mayak” Publ., 2011. 143 p. (in Russian).
8. Kononenko O. A., Milyutin V. V., Kozlitin E. A., Gelis V. M. Utilization of pulps of ferrocyanide sorbents by cementing. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti* [Issues of Radiation Safety], 2011, no. 3, pp. 13–19 (in Russian).
9. Milyutin V. V., Gelis V. M., Nekrasova N. A., Kononenko O. A., Vezentsev A. I., Volovicheva N. A., Korol’kova S. V. Sorption of Cs, Sr, U and Pu radionuclides on natural and modified clays. *Radiochemistry*, 2012, vol. 54, no. 1, pp. 75–78. <https://doi.org/10.1134/S1066362212010110>
10. Song-Hyok Ri, Yong-Nam Kim, Sun-Jong Im, Song-Gun Choe, Chol-Hyok Kim. Selective separation of cesium from radioactive liquid waste by potassium copper hexacyanoferrate (II)-clinoptilolite composite. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2023, vol. 332, pp. 2329–2337. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-08821-8>
11. Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Kaptakov V. O. Modern sorption materials for cesium and strontium radionuclide extraction from liquid radioactive waste. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2020, no. 4 (13), pp. 80–89 (in Russian). <https://doi.org/10.25283/2587-9707-2020-4-80-89>
12. Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Kaptakov V. O., Kozlitin E. A. Adsorption techniques for decontaminating liquid radioactive waste and radionuclide-contaminated natural water. *Adsorption*, 2023, vol. 29, pp. 323–334. <https://doi.org/10.1007/s10450-023-00407-w>
13. Ja-Young Goo, Bong-Ju Kim, Jang-Soon Kwon, Ho Young Jo. Bentonite alteration and retention of cesium and iodide ions by Ca-bentonite in alkaline and saline solutions. *Applied Clay Science*, 2023, vol. 245, art. ID 107141. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.107141>
14. Liu Mengliang, Hu Yang, Lai Zhenyu, Yan Tao, He Xin, Wu Jie, Lu Zhongyuan, Lv Shuzhen. Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 241, art. ID 1180151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118015>
15. Plecas I., Dimović S. Influence of natural sorbents on the immobilization of spent ion exchange resins in cement. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2006, vol. 269, no. 1, pp. 181–185. <https://doi.org/10.1007/s10967-006-0248-9>
16. Kozlov P. V. *Development of Technology for Immobilization of Liquid Salt-Containing Medium-Active Waste Into a Cement Matrix with Subsequent Storage of the Compound in Large-Volume Compartments*. St. Petersburg, 2009. 163 p. (in Russian).
17. Bykhovskaya T. A., Zakharova K. P., Karpova T. T., Masanov O. L., Khimchenko O. M., Dmitriev S. A., Barinov A. S., Varlakov A. P. Influence of Clay Additives on the Properties of Cement Compounds Used for Radioactive Waste Containment. *Atomic Energy*, 1995, vol. 79, pp. 431–434. <https://doi.org/10.1007/bf02406200>
18. Konopleva I. V. Selective sorption of radiocesium by sorbents based on natural clays. *Sorbtsionnye i khromatograficheskie protsessy = Sorption and Chromatographic Processes*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 446–456 (in Russian).
19. Marques Fernandes M., Klinkenberg M., Baeyens B., Bosbach D., Brandt F. Adsorption of Ba and ^{226}Ra on illite: A comparative experimental and modelling study. *Applied Geochemistry*, 2023, vol. 159, art. ID 105815. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105815>
20. Kononenko O. A., Gelis V. M., Milyutin V. V. Incorporation of NPP residues into matrices based on Portland cement and silica additives. *Atomic Energy*, 2011, vol. 109, pp. 278–284. <https://doi.org/10.1007/s10512-011-9357-9>
21. Maskalchuk L. N., Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Leontieva T. G., Baklay A. A., Belousov P. E., Krupskaya V. V. Aluminosilicate sorbents based on clay-calcium silicates JSC “Belaruskali” for sorption of cesium and strontium radionuclides. *Radiochemistry*, 2020, vol. 62, no. 3, pp. 381–386. <https://doi.org/10.1134/S1066362220030108>
22. Leont’eva T. G., Moskal’chuk L. N., Baklai A. A. Prospects for the use of clay-salt sludge of JSC “Belaruskali” for the purification of aquatic environments and ecosystems from radiocesium. *Trudy BGTU. Ser. 3, Khimiya i tekhnologiya neorganicheskikh veshchestv = Proceedings of BSTU. Ser. 3: Chemistry and Technology Inorganic Substances*, 2016, no. 3, pp. 74–80 (in Russian).
23. Baklai A. A., Moskal’chuk L. N., Leont’eva T. G., Makovskaya N. A. Sorption of $^{137}\text{Cs}^+$ from aqueous media by an illite-containing sorbent obtained from clay-salt sludge of JSC “Belaruskali”. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya = Chemistry for Sustainable Development*, 2020, no. 4, pp. 366–371 (in Russian).

24. Lebedev V. A., Piskunov V. M. Analysis of the vat residue of radioactive waste and the development of matrix mixtures for immobilization of the compound on the basis of mineral binders nanomodified. *Zapiski Gornogo instituta = Journal of Mining Institute*, 2013, vol. 203, pp. 55–58 (in Russian).

25. Povarov V. P., Rosnovskii S. V., Mel'nikov E. S., Bulka S. K., Ivanov E. A., Yudakov A. Yu. Ensuring Compliance of Cemented Radwastes in NZK Containers with the Criteria of Acceptance for Final Disposal. *ANRI (Apparatura i novosti radiatsionnykh izmerenii) = ANRI*, 2022, no. 1 (108), pp. 45–55 (in Russian). <https://doi.org/10.37414/2075-1338-2022-108-1-45-55>