

# ВЕСЦІ

## НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

---

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2023. Т. 68, № 1

---

# ИЗВЕСТИЯ

## НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2023. Т. 68, № 1

---

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

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Г л а в н ы й   р е д а к т о р

**Сергей Антонович Чижик** –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

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

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

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

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

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

**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
- 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. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- О. Г. Пенязков** – 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

*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. 2023. Т. 68, № 1

*Выходит на русском, белорусском и английском языках*

---

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

Подписано в печать 17.03.2023. Выход в свет 28.03.2023. Формат 60 × 84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 70 экз. Заказ 49.  
Цена номера: индивидуальная подписка – 12,66 руб., ведомственная подписка – 29,74 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

© РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,  
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2023

# PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2023, vol. 68, 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  
(Associate Editor-in-Chief)

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

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

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

**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

**Sergei M. Kostromitsky** – Radio Engineering Center 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 G. Kravtsov** – Presidium 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  
**Nikolai K. Myshkin** – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Gomel, Republic of Belarus  
**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  
**Valeri 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

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

---

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.

Physical-technical series, 2023, vol. 68, no. 1

*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

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

It is sent of the press 17.03.2023. Appearance 28.03.2023. Format  $60 \times 84 \frac{1}{8}$ . Offset paper. The press digital.

Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 70 copies. Order 49.

Number price: individual subscription – 12,66 byn., departmental subscription – 29,74 byn.

Publisher and printing execution:

Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya navuka"

Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2,  
2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina Str., Minsk, 220084,  
Republic of Belarus.

© RUE "Publishing House "Belaruskaya Navuka",  
Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series, 2023

## СОДЕРЖАНИЕ

### МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Гасенкова И. В., Мухуров Н. И., Андрухович И. М. Анодирование алюминия в вязком электролите для формирования одномерных фотонных кристаллов . . . . .	7
Бурич А. А., Залесский В. Г., Поболь И. Л. Устранение дефектов сварного соединения в ниобиевом сверхпроводящем резонаторе . . . . .	18
Янкевич С. Н., Хроль И. Н., Калиновский Н. А. Оценка прочностных характеристик полимерных материалов для изготовления элементов персонального электротранспорта . . . . .	24

### МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА

Журавков М. А., Петровский А. Б., Прушак В. Я., Николайчик М. А., Пузанов Д. А., Климович Н. М. Моделирование геомеханического состояния повторно подрабатываемых массивов горных пород (на английском языке) . . . . .	32
---	----

### ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Акулич П. В., Седнин В. А., Позднякова М. И. Тепломассообмен капель концентрированных растворов при распылительной дегидратации в условиях конвективно-радиационного энергоподвода . . . . .	40
Ольшанский А. И., Климентьев А. Л., Котов А. А. Тепломассообмен в процессах сушки тонких натуральных кож внаклейку на гладкие поверхности . . . . .	50

### РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Хмарский П. А., Солонар А. С., Наумов А. О. Устройство траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации . . . . .	60
--	----

### ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Горбачева Н. В., Корчева Ю. А., Кузьмина Н. Д., Кулич Н. В., Яцко С. Н. Ранжирование долгоживущих радионуклидов ядерного топливного цикла Белорусской АЭС по вкладам в потенциальную биологическую опасность . . . . .	72
Жук И. В., Гусак К. В., Хакимов Д. А. Использование метода гамма-спектрометрии для определения концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды . . . . .	82

**CONTENTS****MATERIALS SCIENCES, METALLURGY**

<b>Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Andruhovich I. M.</b> Anodizing aluminum in a viscous electrolyte to produce one-dimensional photonic crystals . . . . .	7
<b>Burin A. A., Zaleski V. G., Pobol I. L.</b> Elimination of defects in a welded joint in a niobium superconducting resonator . . . . .	18
<b>Yankevich S. N., Khrol I. N., Kalinovskij N. A.</b> Evaluation of the strength characteristics of polymer materials for the manufacture of personal electric vehicle elements . . . . .	24

**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

<b>Zhuravkov M. A., Petrovskiy A. B., Prushak V. Ya., Nikolaitchik M. A., Puzanov D. A., Klimkovich N. M.</b> Modeling of the geomechanical state of the rock massifs being undermined repeatedly . . . . .	32
---	----

**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

<b>Akulich P. V., Sednin V. A., Pozdnyakova M. I.</b> Heat and mass transfer of drops of concentrated solutions during spray dehydration under conditions of convective-radiation energy supply . . . . .	40
<b>Olshanski A. I., Klimentyev A. L., Kotow A. A.</b> Heat and mass transfer in the processes of drying thin natural leathers pasted on smooth surfaces . . . . .	50

**RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING**

<b>Khmarskiy P. A., Solonar A. S., Naumov A. O.</b> Device of tracking processing for indicator channel of short-range radio navigation systems . . . . .	60
---	----

**DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS**

<b>Harbachova N. V., Korchova Ju. A., Kuzmina N. D., Kulich N. V., Yacko S. N.</b> The long-lived radionuclides radiotoxicity ranking the nuclear fuel cycle of the Belarusian NPP . . . . .	72
<b>Zhuk I. V., Husak K. V., Hakimov D. A.</b> Using the gamma spectrometry method to determine the concentration of radon in samples of mineral radon water . . . . .	82

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

**МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**  
**MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY**

УДК 539.216;535.3  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-7-17>

Поступила в редакцию 01.12.2022  
Received 01.12.2022

**И. В. Гасенкова, Н. И. Мухуров, И. М. Андрухович**

*Государственное научно-производственное объединение  
«Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника», Минск, Республика Беларусь*

**АНОДИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЯ В ВЯЗКОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ  
ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ОДНОМЕРНЫХ ФОТОННЫХ КРИСТАЛЛОВ**

**Аннотация.** Показана возможность формирования анодного оксида алюминия (АОА) со свойствами одномерного фотонного кристалла вдоль нормали к поверхности. Структура АОА представлена чередующимися слоями различной пористости и сформирована в вязком электролите на основе серной кислоты и этиленгликоля при периодически изменяющейся плотности тока с 1,8 на 0,4 мА/см<sup>2</sup> с прямоугольной формой импульса. Определены размеры пор и расстояние между ними, плотность пор и пористость, толщина и период структуры АОА. Изучены особенности спектров зеркального отражения одиночных составляющих структуру АОА слоев и структур одномерных фотонных кристаллов, сформированных из 165 периодов, каждый из которых соответствовал росту оксида при плотностях тока 1,8 и 0,4 мА/см<sup>2</sup>. Отмечено увеличение пористости верхних слоев структуры вследствие химического травления пор в процессе роста оксида. Показано, что неизменность спектрального положения фотонной запрещенной зоны для структур АОА достигается уменьшением заряда на каждом последующем цикле анодирования на 0,1 % при их формировании, что приводит к уменьшению периода структуры в нижних слоях, компенсируя рост пористости в верхних слоях. Спектры отражения проанализированы для углов падения 10° и 30° и использованы для расчета периода структуры и эффективного показателя преломления. Эффективный показатель преломления одиночных составляющих структуру АОА слоев рассчитан с использованием оптических осцилляций Фабри–Перо. Для АОА со свойствами одномерного фотонного кристалла при нормальном падении света наблюдается зеленая окраска, а при изменении угла – радужная. АОА может быть использован как декоративное покрытие на корпусах электронных приборов (планшеты, ноутбуки, телефоны и др.) и при создании объектов дизайна из алюминия и его сплавов.

**Ключевые слова:** анодный оксид алюминия, периодически изменяющаяся пористость, одномерные фотонные кристаллы, коэффициент отражения, фотонная запрещенная зона, осцилляции Фабри–Перо

**Для цитирования:** Гасенкова, И. В. Анодирование алюминия в вязком электролите для формирования одномерных фотонных кристаллов / И. В. Гасенкова, Н. И. Мухуров, И. М. Андрухович // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 7–17. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-7-17>

**Irina V. Gasenkova, Nikolai I. Mukhurov, Iryna M. Andruhovich**

*State Scientific and Production Association “Optics, Optoelectronics and Laser Technology”, Minsk, Republic of Belarus*

**ANODIZING ALUMINUM IN A VISCOUS ELECTROLYTE  
TO PRODUCE ONE-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTALS**

**Abstract.** In the paper, the possibility to produce anodic aluminum oxide (AAO) featuring one-dimensional photonic crystal along the normal to the surface is shown. The AAO structure is represented by alternating layers of different porosity and is formed in a viscous electrolyte based on sulfuric acid and ethylene glycol at the periodically varying from high (1.8 mA/cm<sup>2</sup>) to low (0.4 mA/cm<sup>2</sup>) current density with a rectangular pulse shape. The pore sizes and interpore distance, pore density and porosity, thickness and period of the AAO structure have been determined. The specular reflection spectra features for single layers that make up the AAO structure and for one-dimensional photonic crystals structures consisting of

165 periods have been studied. An increase in the porosity of the upper layers of the structure due to chemical etching of the pores during the oxide growth is noted. It is shown that the invariance of the spectral position of the photonic band gap for AAO structures is achieved by a 0.1 % decrease in charge at each subsequent anodizing cycle during their formation, which leads to a decrease in the period of the structure in the lower layers, compensating for the increase in the upper layers porosity. The reflection spectra have been analyzed for the incidence angles of 10° and 30° and used to calculate the period of the structure and the effective refractive index. The effective refractive index of the single layers that make up the AAO structure is calculated using the optical Fabry–Perot oscillations. For AAO with the properties of one-dimensional photonic crystal, a green color is observed at normal light incidence, and an iridescent color is observed when the angle changes. AAO can be used as a decorative coating on the housings of electronic devices (tablets, laptops, phones, etc.) and when creating design objects made of aluminum and its alloys.

**Keywords:** anodic aluminum oxide, periodically changing porosity, one-dimensional photonic crystals, reflection coefficient, photonic band gap, Fabry–Perot oscillations

**For citation:** Gasenkova I. V., Mukhurov N. I., Andruhovich I. M. Anodizing aluminum in a viscous electrolyte to produce one-dimensional photonic crystals. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 7–17 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-7-17>

**Введение.** Полученный электрохимическим окислением анодный оксид алюминия (АОА) обладает пористой структурой, поры в которой расположены преимущественно вдоль нормали к поверхности и имеют гексагональную упаковку в плоскости поверхности [1, 2]. При этом размером пор, межпоровым расстоянием, длиной пор и их плотностью (пористой структурой) можно управлять изменением условий анодирования: плотностью тока и напряжением, составом электролита, его концентрацией и температурой [3–5]. Изменяя плотность тока и/или напряжение между высокими и низкими значениями, можно формировать анодный оксид с отличающимися различной степенью пористости слоями. Такие оксиды обладают возможностью присутствия в их спектре фотонных запрещенных зон, для которых характерно сильное отражение излучения в определенных диапазонах частот, и являются одномерными фотонными кристаллами в направлении нормали к поверхности [3, 6–8]. При расположении фотонной запрещенной зоны в видимом диапазоне наблюдается окрашивание поверхности оксида алюминия, а цвет покрытия определяется спектральным диапазоном с соответствующим интенсивным отражением падающего светового потока [9, 10]. Из-за большей длины волны видимого диапазона излучения по сравнению с размерами пор оптические свойства пористого анодного оксида можно рассматривать как эффективную среду с эффективным показателем преломления [11].

Формирование АОА со свойствами одномерного фотонного кристалла представляет и теоретический, и практический интерес. В настоящее время для получения фотонных кристаллов АОА используются периодически изменяющиеся параметры электрических тока или напряжения с различными профилями: прямоугольные формы импульсов, треугольные, сложной формы и синусоидальные, импульсные гауссовы [12–15]. Применение разнообразных подходов показывает сложность формирования одномерных фотонных кристаллов АОА с управляемым расположением фотонной запрещенной зоны и необходимость дальнейшего совершенствования технологических приемов. Несмотря на достигнутые результаты, остаются нерешенными окончательно вопросы по выбору состава электролита, его концентрации и температуры для уменьшения химического травления пор в процессе роста оксида и получения заданного положения фотонной запрещенной зоны.

*Цель настоящей работы* – исследование влияния спектров зеркального отражения одномерных фотонных кристаллов на основе АОА, полученных в вязком электролите при периодически изменяющейся плотности тока с прямоугольной формой импульса, на положение фотонной запрещенной зоны и изменение цвета фотонного кристалла в зависимости от количества слоев.

**Методика формирования образцов.** В качестве исходного материала использовали алюминиевую фольгу (99,99 %), предварительно отрифтованную и полированную. Площадь образца составляла 9,0 см<sup>2</sup>. Электролитом служила 1,0 М серная кислота с добавкой этиленгликоля (50 %об.), температура электролита составляла 5 °С. Добавка этиленгликоля в электролит анодирования позволила уменьшить скорость растворения стенок пор анодного оксида, обеспечив лучшие условия для постоянства оптического периода.

Процесс анодирования проводили в двухэлектродной ячейке, где одновременно располагалось два образца. Периодические изменения плотности электрического тока анодирования использовали для синтеза АОА с пористой структурой, модулированной вдоль нормали к поверхности пленки. Плотность тока варьировали в пределах одного периода от 0,4 до 1,8 мА/см<sup>2</sup> с соотношением 1,0 : 4,5. При этом каждый период состоял из двух стадий: на первой стадии анодирование проводили при плотности тока 0,4 мА/см<sup>2</sup>, на второй – при 1,8 мА/см<sup>2</sup>. Максимальное количество периодов равнялось 165, максимальное время анодирования составляло 1667 мин. В процессе анодирования на первой и второй стадиях поддерживали одинаковую плотность заряда  $G$ , которую отсчитывали от начала соответствующей стадии, определяя численным интегрированием зависимости тока от времени:

$$G = \int \frac{I(t)dt}{S}, \tag{1}$$

где  $I$  – сила тока, А;  $t$  – время, мин;  $S$  – площадь поверхности анодирования, см<sup>2</sup>.

По достижении на каждой стадии значения 0,22 Кл переходили к последующим циклам анодирования. Величину электрического заряда для каждого последующего цикла анодирования сокращали на 0,1 %, чтобы компенсировать травление в электролите верхних слоев структуры и тем самым сохранить постоянство оптического периода создаваемой сложной структуры АОА. Процесс анодирования, в силу достаточно большой длительности, прерывался 3 раза.

Спектры зеркального отражения в диапазоне длин волн 190–1100 нм были исследованы с помощью спектрофотометра МС 122 (Proscan Special Instruments, Беларусь). Измерения спектров отражения относительно вертикали к поверхности образцов проводились при углах падения 10° и 30°. Все измерения осуществлялись при комнатной температуре на воздухе.

Изображения поверхностей и сколов образцов анодного оксида алюминия были получены с помощью сканирующего электронного микроскопа Hitachi S-4800 (Япония) в режиме вторичных электронов. Морфологические параметры АОА (толщина, диаметр пор и ячеек) измерены на СЭМ-изображениях непосредственно при их получении. Для более точного определения параметров проводили не менее пяти измерений.

**Обсуждение полученных результатов.** На рис. 1 приведены зависимости электрического тока и соответствующего напряжения от заряда в процессе анодирования алюминия в начальный момент роста анодного оксида. Видно, что зависимость напряжения имеет отличный от прямоугольного вид изменения плотности тока с 0,4 до 1,8 мА/см<sup>2</sup>. При увеличении плотности тока наблюдается линейный рост напряжения, соответствующий обычному виду зависимости напряжения в начальный момент анодирования в гальваностатическом режиме. Максимального значения 31,5 В напряжение достигает к 60 % периода анодирования при токе высокой плотности, уменьшаясь к концу периода, и при изменении плотности тока с 1,8 на 0,4 мА/см<sup>2</sup> наблюдается резкий спад напряжения от 29,3 до 27,6 В с последующим плавным уменьшением до конца периода анодирования при низком значении тока.

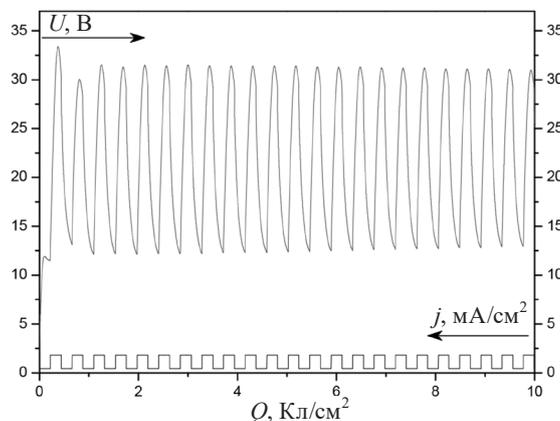


Рис. 1. Зависимости плотности тока и напряжения анодирования от плотности заряда

Fig. 1. Dependences of current density and anodizing voltage on charge density

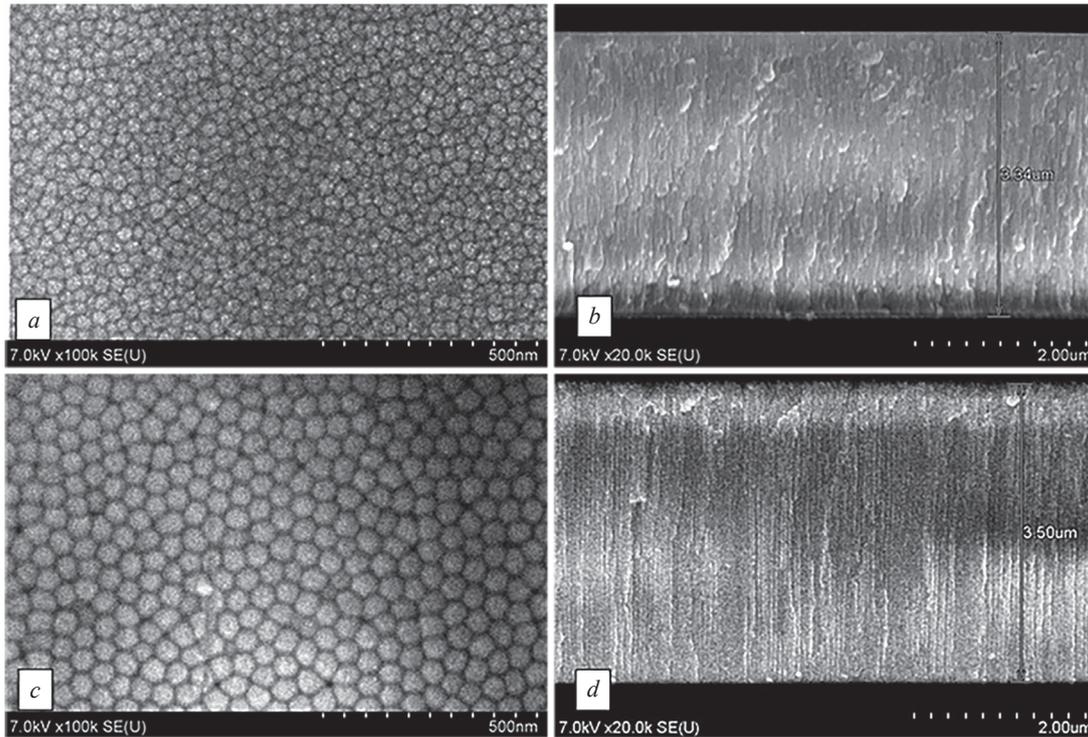


Рис. 2. Морфология поверхности со стороны АОА – алюминий (а, с) и скол (b, d) образцов АОА, сформированных при плотностях тока 0,4 мА/см<sup>2</sup> (а, b) и 1,8 мА/см<sup>2</sup> (с, d)

Fig. 2. Surface morphology from the AAO – aluminum (a, c) and chipped (b, d) samples of AAO formed at current densities of 0.4 mA/cm<sup>2</sup> (a, b) and 1.8 mA/cm<sup>2</sup> (c, d)

Минимальное значение напряжения равнялось 12,2 В, соотношение между максимальным и минимальным напряжением составляло 2,6 : 1,0, что, согласно [16], необходимо для ветвления пор и, соответственно, для изменения пористости. В течение всего процесса анодирования максимальные напряжения для каждого периода увеличивались всего на 1 %. Минимальное значение напряжения возросло до 20 % в течение начальных 55 циклов и далее медленно увеличивалось на 7 %, оставаясь практически постоянным на конечных 20 циклах. При этом отношение значений напряжений максимального к минимальному снизилось до 2 : 1, что достаточно для изменения пористости чередующихся слоев.

На рис. 2 представлена морфология поверхности образцов, полученных при прохождении электрического заряда плотностью 10 Кл/см<sup>2</sup> и при плотностях тока анодирования 0,4 и 1,8 мА/см<sup>2</sup>. Видно, что при повышении плотности тока анодирования происходит увеличение степени упорядочения оксида, улучшается гексагональное строение ячеек.

Плотность ячеек ( $p_{\text{int}}$ , шт/мкм<sup>2</sup>) рассчитывали по формуле [17]

$$p_{\text{int}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \left( \frac{1}{D_{\text{int}}} \right)^2, \quad (2)$$

где  $D_{\text{int}}$  – диаметр ячейки, нм.

Пористость анодного оксида алюминия ( $P$ , %) определяли согласно выражению

$$P = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left( \frac{D_p}{D_{\text{int}}} \right)^2, \quad (3)$$

где  $D_p$  – диаметр поры, нм.

Для образца, сформированного при плотности тока 0,4 мА/см<sup>2</sup>, средний диаметр пор составлял 7,14 нм, средний диаметр ячеек – 30,93 нм (см. рис. 2, а), пористость – 4,83 % и плотность ячеек 1209 шт/мкм<sup>2</sup>. Увеличение плотности тока при формировании оксида привело к уменьше-

нию пористости. Для образца, сформированного при большей плотности тока, средний диаметр пор составлял 11,62 нм, средний диаметр ячеек – 55,42 нм (рис. 2, с), пористость – 3,99 %, плотность ячеек – 372 шт/мкм<sup>2</sup> (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Параметры одиночных слоев, полученные из данных СЭМ и измерений спектров зеркального отражения

T a b l e 1. Parameters of single layers obtained from SEM data and measurements of specular reflection spectra

Плотность тока, $j$ , мА/см <sup>2</sup>	Положение интерференционных максимумов		Эффективный показатель преломления, $n_{эф}$ , отн. ед.	Толщина, $h$ , мкм	Средний диаметр ячеек, $D_{шт}$ , нм	Средний диаметр пор, $D_p$ , нм	Пористость, $P$ , %
	$\lambda_1$ , нм	$\lambda_2$ , нм					
0,4	340	362	1,6840	3,34	30,93	7,14	4,83
	524	576	1,7465	–	–	–	–
	679	771	1,7125	–	–	–	–
1,8	339	359	1,7472	3,50	55,42	11,62	3,99
	528	578	1,7525	–	–	–	–
	715	813	1,7036	–	–	–	–

Согласно рис. 2, *b, d*, толщина пленок оксида алюминия при прохождении электрического заряда плотностью 10 Кл/см<sup>2</sup> составляет 3,34 и 3,50 мкм для образцов, полученных при плотностях тока 0,4 и 1,8 мА/см<sup>2</sup> соответственно. Путем деления толщины пленки оксида на плотность заряда рассчитаны толщины пленок при прохождении заряда 1 Кл/см<sup>2</sup>. Зная эти значения и учитывая, что при формировании многослойной структуры на каждой стадии проходил заряд, равный 0,22 Кл, рассчитаны толщины одиночных слоев. Установлено, что они составляют 73,48 нм при плотности тока 0,4 мА/см<sup>2</sup> и 77,0 нм – при 1,8 мА/см<sup>2</sup>, таким образом, рассчитанная величина периода формируемой структуры равна 150,48 нм. Спектры отражения одиночных слоев, составляющих период фотонной структуры и сформированных на алюминии при указанных плотностях тока и количестве протекшего заряда, равном 10 Кл, приведены на рис. 3.

Видно, что на спектрах присутствуют осцилляции, которые объясняются интерференцией света, отраженного от поверхности АОА и границы АОА – подложка алюминия. АОА представляет собой композит из двух сред с различными диэлектрическими проницаемостями, одна из которых собственно оксид, а вторая – воздух в порах. При этом характерные размеры структурных элементов каждой из сред (максимально наблюдаемый диаметр пор 16 нм и минимально наблюдаемый 6 нм) много меньше длины световой волны, поэтому АОА можно рассматривать как однородную оптическую среду.

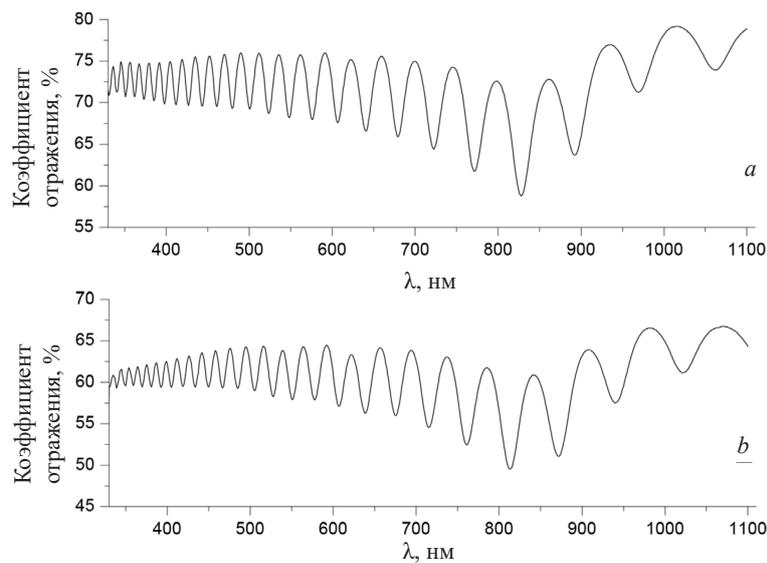


Рис. 3. Спектры отражения образцов АОА, сформированных при плотностях тока: *a* – 0,4 мА/см<sup>2</sup>, *b* – 1,8 мА/см<sup>2</sup>

Fig. 3. Reflection spectra of AAO samples formed at current densities: *a* – 0.4 mA/cm<sup>2</sup>, *b* – 1.8 mA/cm<sup>2</sup>

Свойства среды могут быть описаны с помощью эффективной диэлектрической проницаемости, а по интерференционным осцилляциям отражения можно найти эффективный показатель преломления. С использованием модели эффективной среды были рассчитаны оптическая толщина для одиночных слоев АОА и эффективный показатель преломления [18]:

$$n_{\text{эф}}^2 = \left( \frac{N_2 - N_1}{2} \cdot \frac{\lambda_1 \lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)h} \right)^2 + \sin^2 \theta, \quad (4)$$

где  $N_1, N_2$  – номера максимумов коэффициента отражения;  $\lambda_1, \lambda_2$  – длины волн, соответствующие максимумам коэффициента отражения, нм;  $h$  – геометрическая толщина образца, нм;  $\theta$  – угол падения светового пучка на образец.

Как следует из табл. 1, существует неоднородность значений эффективного показателя преломления при расчете для различных участков длин волн. Среднее значение эффективного показателя преломления для образца АОА, сформированного при  $0,4 \text{ мА/см}^2$ , составило  $1,7143 (n_1)$ , для образца, сформированного при  $1,8 \text{ мА/см}^2$ , –  $1,7344 (n_2)$ .

Положение фотонной запрещенной зоны первого порядка в многослойной структуре, образованной чередующимися одиночными слоями с установленными эффективными показателями преломления ( $n_1 = 1,7143, n_2 = 1,7344$ ) и толщинами ( $h_1 = 73,48 \text{ нм}, h_2 = 77,00 \text{ нм}$ ), при нормальном угле падения ( $\theta = 0^\circ$ ) имеет вид:  $n_1 h_1 + n_2 h_2 = \lambda/2$  [19] и равняется  $519,03 \text{ нм}$ .

На рис. 4 представлены СЭМ-изображения поперечного сечения сформированной при периодически изменяемой плотности тока структуры АОА. Видно, что структура многослойна и состоит из слоев различной пористости, количество периодов структуры соответствует количеству циклов изменения плотности тока. На границах между слоями отмечается ветвление пор с большим диаметром на как минимум две поры с меньшим диаметром, при этом границы трудно различимы.

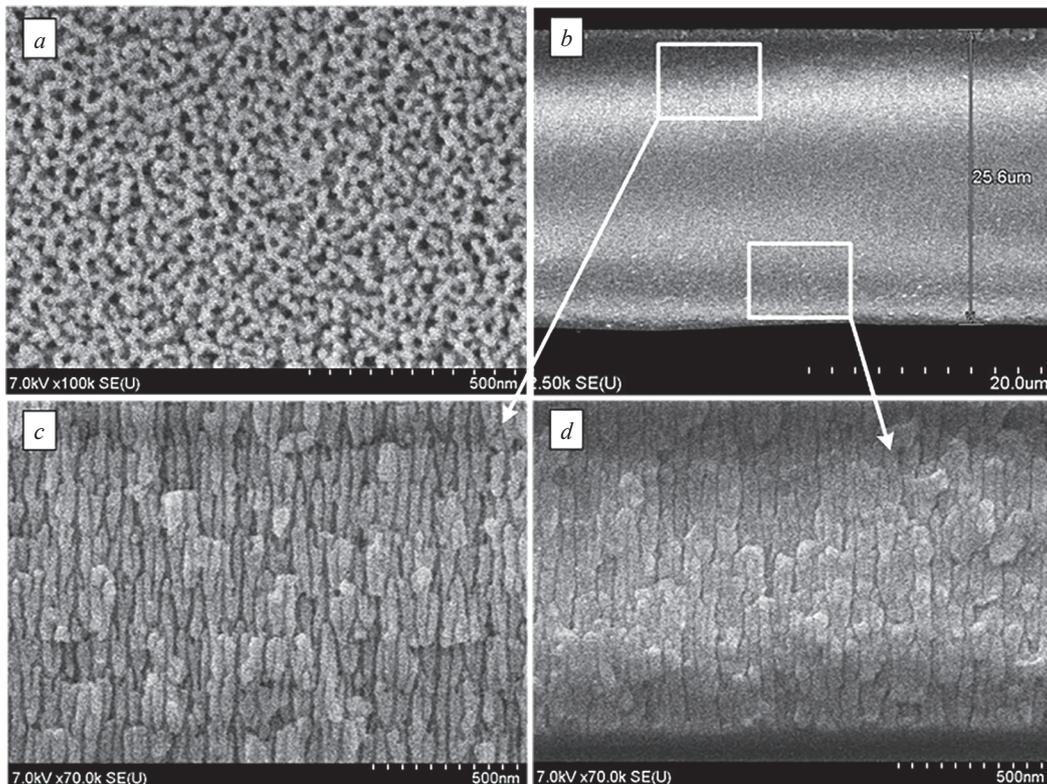


Рис. 4. Морфология поверхности многослойного образца со стороны электролит – АОА (а), скол (b) и увеличенный скол вблизи поверхности электролит – АОА (с), увеличенный скол вблизи границы АОА – алюминий (d)

Fig. 4. Morphology of the surface of the multilayer sample from the side of electrolyte – AAO (a), cleavage (b) and increased cleavage near the surface of electrolyte – AAO (c), increased cleavage near the boundary of AAO – aluminum (d)

Анализ поперечных сечений позволил установить различие в пористости слоев вблизи поверхностей электролит – АОА и АОА – алюминий, которое возникает вследствие химического травления пор в процессе анодирования. Вблизи поверхности электролит – АОА средний диаметр пор увеличивается с 11,5 по 16,0 нм для слоев, полученных при плотности тока  $1,8 \text{ мА/см}^2$ , а вблизи барьерного слоя остается неизменным и равным значениям 11,5 нм, соответствующим одиночным слоям при тех же условиях формирования. На самой поверхности оксида со стороны электролит – АОА наблюдаются поры диаметром до 24 нм. Следует отметить, что отличие в величинах пористости слоев структуры не позволяет добиться постоянства оптического периода формируемой структуры. Оптический период структуры, определяемый как произведение эффективного показателя преломления на период структуры, в этом случае будет неизбежно больше для слоев оксидной пленки вблизи поверхности АОА – алюминий по сравнению со слоями вблизи поверхности электролит – АОА, дольше находящимися в электролите и подверженными химическому травлению.

Для сохранения постоянства оптического периода при формировании структуры необходимо уменьшать толщину каждого последующего периода, что в ходе технологического процесса достигалось уменьшением протекающего заряда в каждом последующем цикле. Толщина структуры составляла 25,6 мкм. Расчетное значение периода получено делением толщины на количество циклов (165) и равно 155,15 нм, что близко к значению, рассчитанному по параметрам одиночных слоев, и подтверждает хорошую воспроизводимость при формировании многослойной структуры.

Спектр зеркального отражения в видимом диапазоне длин волн образца АОА, сформированного в вязком электролите при чередовании прямоугольных импульсов тока, представлен на рис. 5. Спектры зеркального отражения образцов снимали при углах падения  $10^\circ$  и  $30^\circ$  по отношению к нормали (площади пучка падающего света).

Видно, что спектры содержат области высокого отражения и области осцилляций коэффициента отражения. Области высокого отражения в фотонных запрещенных зонах соответствуют условию невозможности распространения света в структуре фотонного кристалла. Сильные пики располагаются на отметках 515 и 265 нм. Поскольку соотношение положений этих пиков составляет примерно  $1 : 1/2$ , они являются первой и второй фотонными запрещенными зонами соответственно. Обнаружено, что положения пиков, полученных с обеих сторон АОА, совпадают в пределах погрешности (см. рис. 5, *b*). Это свидетельствует о том, что при различной пористости слоев вблизи сторон электролит – АОА и АОА – алюминий, как следует из электронно-микроскопических исследований, уменьшения заряда на каждой последующей стадии на

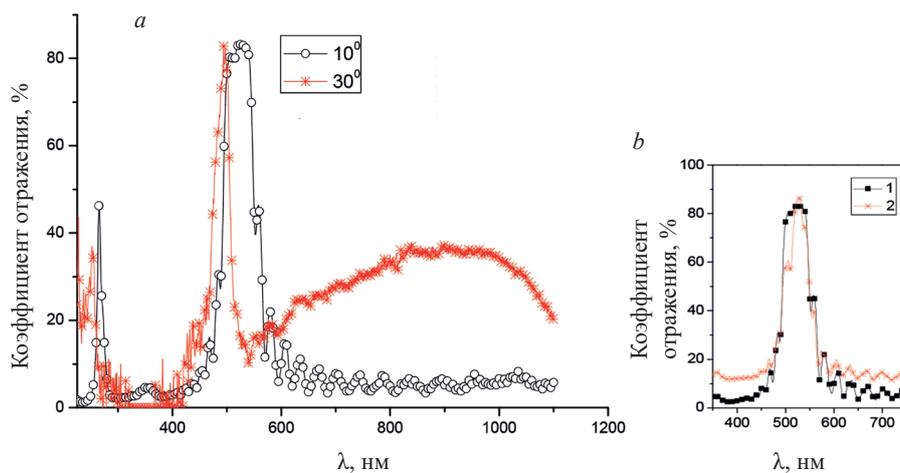


Рис. 5. Спектр зеркального отражения образца АОА (*a*) при угле падения светового пучка  $10^\circ$  и  $30^\circ$ ; спектры отражения образца со стороны: АОА – алюминий (1) и электролит – АОА (2) в области первой фотонной запрещенной зоны (*b*)

Fig. 5. The specular reflection spectrum of the AAO sample (*a*) at the angle of incidence of the light beam of  $10^\circ$  and  $30^\circ$ ; the reflection spectra of the sample from the side: AAO – aluminum (1) and electrolyte – AAO (2) in the region of the first photon band gap (*b*)

0,1 % достаточно для компенсации химического травления пор вблизи поверхности образца при формировании в вязком электролите. По данным [20], в серном электролите степень травления больше, что обуславливает различие в положениях пиков отражения и требует увеличения коэффициента для компенсации заряда на каждой стадии.

Сравнение спектров отражения (угол падения  $10^\circ$ ) в разных точках образцов фотонных кристаллов, полученных на площади  $9 \text{ см}^2$ , выявляет отличие спектроскопических характеристик в исследуемых условиях формирования анодного оксида со слоями различной пористости: положения максимумов спектров отличаются на 16 нм.

При увеличении угла падения наблюдается сдвиг максимума спектра в область более коротких длин волн (от 515 нм при  $10^\circ$  и до 494 нм при  $30^\circ$  соответственно), что согласуется с законом Вульфа–Брэгга. Поскольку геометрическая толщина пленок АОА остается величиной постоянной, то спектры зеркального отражения при разных углах падения светового пучка могут быть использованы для расчета периода структуры и эффективного показателя преломления в соответствии с законом Брэгга–Снелла

$$m\lambda = 2d\sqrt{n_{\text{эф}}^2 - \sin^2\theta}, \quad (5)$$

где  $m$  – порядок отражения,  $d$  – период структуры.

Данные расчетов приведены в табл. 2. Величины периода структуры 155,23 нм со стороны электролит – АОА и 158,96 нм со стороны АОА – алюминий согласуются со значением 155,15 нм, полученным на основании СЭМ-изображений, а величины показателя преломления 1,6679 и 1,6323 – с данными работы [21] для пленок АОА, полученных в сернокислых электролитах (см. табл. 2). Расчетное положение пика при угле  $\theta = 0^\circ$  коррелирует с данными, рассчитанными из одиночных образцов (519,03 нм). Пористость верхних слоев (со стороны электролит – АОА) многослойной структуры рассчитана по формуле (3) при подстановке значений диаметров поры и ячейки, определенных по СЭМ-изображению скола структуры, и составляет 11,79 %. На СЭМ-изображениях поверхности оксидной пленки наблюдаются поры диаметром 20–24 нм.

Т а б л и ц а 2. Параметры многослойной структуры АОА, полученные из данных спектров зеркального отражения

Table 2. Parameters of the multilayer AOA structure obtained from the specular reflection spectra data

Экспериментальное положение пика (при $\theta = 10^\circ$ ), $\lambda_{\text{ср}}$ , нм	Сторона с соответствующей границей	Величина периода структуры, $d$ , нм	Эффективный показатель преломления, $n_{\text{эф}}$ , отн. ед.	Расчетное положение пика (при $\theta = 0^\circ$ ), $\lambda$ , нм	Показатель преломления стенок ячеек АОА, $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ , отн. ед.	Пористость, $P$ , %
515	Электролит – АОА	155,23	1,6679	517,82	1,7374	11,79
516	АОА – алюминий	158,96	1,6323	518,94	1,6746	–

В модели эффективной среды, применяемой для описания оптических свойств анодного оксида, величину эффективного показателя преломления  $n_{\text{эф}}$  можно вычислить, используя значения пористости:

$$n_{\text{эф}}^2 = n_{\text{Al}_2\text{O}_3}^2(1 - P) + P, \quad (6)$$

где  $n_{\text{Al}_2\text{O}_3}$  – показатель преломления стенок ячеек АОА.

Исходя из формулы (6) определили величину показателя преломления стенок ячеек анодного оксида (см. табл. 2), которая меньше значения показателя преломления для сапфира, равного 1,77, и согласуется с данными, приведенными в [21] для сформированного в щавелевом электролите оксида (1,67) и серной кислоты (1,70). Меньшее значение показателя преломления стенок ячеек пористого оксида, по мнению авторов [21], обусловлено наличием примесей, присутствие которых характерно для АОА, сформированного в кислотных электролитах.

Пленки АОА со сформированной периодической структурой в зависимости от угла падения света и угла наблюдения обладают различной цветовой гаммой. Окрашивание АОА происходит

за счет наличия запрещенной зоны у фотонного кристалла: в соответствии со спектром отражения при углах падения, близких к нормали, наблюдается зеленый цвет, который становится заметным при количестве периодов анодирования свыше 120. Зеленая окраска сохраняется и у образца, сформированного за 165 периодов, при этом цвет достаточно насыщенный. Высокий коэффициент отражения (порядка 80–90 %) определяет интенсивную окраску и качество фотонного кристалла из анодного оксида. При изменении угла наблюдения меняется и цвет анодного оксида (становится радужным). Со стороны пористого слоя наблюдаются такие цвета, как фиолетово-красный, пурпурный, коричнево-серый, охра, травяной (зеленого папоротника), серо-зеленый, зеленой мяты, бирюзовый, аквамаринный, синей стали, сизый и васильковый.

**Заключение.** Получены периодические многослойные структуры АОА со свойствами одномерного фотонного кристалла в направлении нормали к поверхности, состоящие из чередующихся слоев различной пористости и с количеством периодов до 165. Образцы сформированы в электролите на основе 1,0 М серной кислоты с добавкой этиленгликоля при периодически изменяющейся плотности тока с 1,8 на 0,4 мА/см<sup>2</sup> при температуре 5 °С. Методами электронной микроскопии определена пористость составляющих структуру одиночных слоев, сформированных при плотностях 0,4 и 1,8 мА/см<sup>2</sup>, которая равна 4,93 и 3,99 %, соответственно. Установлено увеличение пористости для многослойной структуры АОА до 11,79 %, обусловленное травлением образца во время проведения процесса анодирования. Изучены и проанализированы спектры зеркального отражения одиночных образцов и многослойной структуры АОА. Определены эффективные показатели преломления образцов АОА, полученных при плотностях 0,4 и 1,8 мА/см<sup>2</sup>, равные 1,7173 и 1,7344 соответственно. Эффективный показатель преломления одиночных слоев рассчитан с учетом максимумов осцилляций Фабри–Перо, многослойной структуры – используя закон Брэгга–Снелла. Для многослойной структуры эффективный показатель преломления составляет 1,6679. Отмечены нарушения постоянства оптического периода вследствие химического травления пор в процессе роста оксида. Для компенсации роста пористости вследствие травления, что приводит к уменьшению показателя преломления в верхних слоях структуры, использовали уменьшение толщины каждого слоя в последующих периодах роста оксида. Идентичность положения фотонной запрещенной зоны для структур оксида с обеих сторон (барьерной и пористой) была получена при уменьшении заряда на каждом последующем периоде на 0,1 %.

Отмечена окрашенность многослойных структур АОА: зеленый цвет начинает проявляться в образцах с количеством периодов равным 120. Для образца, сформированного за 165 периодов, при нормальном падении света характерна зеленая окраска, а при изменении угла – радужная.

АОА может быть использован как декоративное покрытие на корпусах электронных приборов (планшеты, ноутбуки, телефоны и др.) и при создании объектов дизайна из алюминия и его сплавов.

### Список использованных источников

1. Masuda, H. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina / H. Masuda, K. Fukuda // *Science*. – 1995. – Vol. 268, № 5216. – P. 1466–1471. <https://doi.org/10.1126/science.268.5216.1466>
2. Lee, W. The anodization of aluminum for nanotechnology applications / W. Lee // *JOM: Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*. – 2010. – Vol. 62, № 6. – P. 57–63. <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0088-5>
3. Santos, A. Nanoporous anodic alumina photonic crystals: fundamentals, developments and perspectives / A. Santos // *J. Mater. Chem. C*. – 2017. – Vol. 5, № 23. – P. 5581–5599. <https://doi.org/10.1039/C6TC05555A>
4. Mukhurov, N. I. Ordered Growth of Anodic Aluminum Oxide in Galvanostatic and Galvanostatic-Potentiostatic Mode / N. I. Mukhurov, I. V. Gasenkova, J. M. Andrukhovich // *JMSN: Journal of Materials Science and Nanotechnology*. – 2014. – Vol. 1, iss. 1. – P. S110 (1–6). <https://doi.org/10.15744/2348-9812.1.S110>
5. Ramana Reddy, P. Effect of electrolyte concentration on morphological and photoluminescence properties of free standing porous anodic alumina membranes formed in oxalic acid / P. Ramana Reddy, K. M. Ajith, N. K. Udayashankar // *Mater. Sci. Semicond. Process.* – 2020. – Vol. 106. – Art. ID 104755. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104755>
6. Спектры пропускания и оптические свойства мезопористого фотонного кристалла на основе анодного оксида алюминия / В. С. Горелик [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Т. 124, вып. 2. – С. 171–177. <https://doi.org/10.21883/OS.2018.02.45519.177-17>
7. Transmission spectra of one-dimensional porous alumina photonic crystals / V. S. Gorelik [et al.] // *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*. – 2018. – Vol. 32. – P. 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2018.08.004>

8. Kushnir, S. E. Anodizing with voltage versus optical path length modulation: a new tool for the preparation of photonic structures / S. E. Kushnir, T. Yu. Pchelyakova, K. S. Napolskii // *J. Mater. Chem.* – 2018. – Vol. 6, № 45. – P. 12192–12199. <https://doi.org/10.1039/C8TC04246B>
9. Rapid fabrication of iridescent alumina films supported on an aluminium substrate by high voltage anodization / Chunxin Sun [et al.] // *Opt. Mater.* – 2022. – Vol. 104. – Art. ID 109937. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109937>
10. Segawa, H. Structural colors of laminated alumina films prepared by ac oxidation in oxalic acid solution / H. Segawa, K. Wada // *Mater. Chem. Phys.* – 2020. – Vol. 250. – Art. ID 123031. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123031>
11. Юрасов, А. Н. Теория эффективной среды как инструмент анализа оптических свойств нанокomпозитов / А. Н. Юрасов, М. М. Яшин // *Рос. технол. журн.* – 2018. – Т. 6, № 2. – С. 56–66. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
12. Tunable Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals by Gaussian Pulse Anodization / L. K. Acosta [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2020. – Vol. 12, № 17. – P. 19778–19787. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b23354>
13. Engineering of Hybrid Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals by Heterogeneous Pulse Anodization / S. Y. Lim [et al.] // *Sci. Rep.* – 2018. – Vol. 8, № 1. – Art. ID 9455. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27775-6>
14. Structural Engineering of Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals by Sawtooth-like Pulse Anodization / C. S. Law [et al.] // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* – 2016. – Vol. 8, № 21. – P. 13542–13554. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b03900>
15. Napolskii, K. S. Control of high-order photonic band gaps in one-dimensional anodic alumina photonic crystals / K. S. Napolskii, A. A. Noyan, S. E. Kushnir // *Opt. Mater.* – 2020. – Vol. 109. – Art. ID 110317. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110317>
16. Petukhov, D. I. Permeability of anodic alumina membranes with branched channels / D. I. Petukhov, K. S. Napolskii, A. A. Eliseev // *Nanotechnology.* – 2012. – Vol. 23, № 33. – P. 5601. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/33/335601>
17. The effect of anodizing temperature on structural features and hexagonal arrangement of nanopores in alumina synthesized by two-step anodizing in oxalic acid / L. Zaraska [et al.] // *Thin Solid Films.* – 2013. – Vol. 534. – P. 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.02.056>
18. Application of infrared interferometry for quantitative analysis of chemical groups grafted onto the internal surface of porous silicon nanostructures / S. A. Alekseev [et al.] // *J. Phys. Chem. C.* – 2007. – Vol. 111, № 42. – P. 15217–15222. <https://doi.org/10.1021/jp0712452>
19. Controlling the color and effective refractive index of metal-anodic aluminum oxide (AAO)-Al nanostructures: morphology of AAO / C. V. Manzano [et al.] // *J. Phys. Chem. C.* – 2017. – Vol. 122, № 1. – P. 957–963. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b11131>
20. Optical properties of one-dimensional photonic crystals based on porous films of anodic aluminum oxide / V. S. Gorelik [et al.] // *Opt. Spectrosc. C.* – 2016. – Vol. 120, № 4. – P. 534–539. <https://doi.org/10.1134/S0030400X16040081>
21. Кинетика формирования и растворения анодного оксида алюминия в электролитах на основе серной и селеновой кислот / А. И. Садыков [и др.] // *Журн. неорган. химии.* – 2021. – Т. 66, № 2. – С. 265–273. <https://doi.org/10.31857/S0044457X21020185>

## References

1. Masuda H., Fukuda K. Ordered metal nanohole arrays made by a two-step replication of honeycomb structures of anodic alumina. *Science*, 1995, vol. 268, pp. 1466–1471. <https://doi.org/10.1126/science.268.5216.1466>
2. Lee W. The Anodization of Aluminum for Nanotechnology Applications. *Journal of the Minerals, Metals and Materials Society*, 2010, vol. 62, no. 6, pp. 57–63. <https://doi.org/10.1007/s11837-010-0088-5>
3. Santos A. Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals: Fundamentals, Developments and Perspectives. *Journal of Materials Chemistry, C*, 2017, vol. 5, no. 23, pp. 5581–5599. <https://doi.org/10.1039/C6TC05555A>
4. Mukhurov N. I., Gasenkova I. V., Andrukhovich I. M. Ordered Growth of Anodic Aluminum Oxide in Galvanostatic and Galvanostatic-Potentiostatic Mode. *JMSN: Journal of Materials Science and Nanotechnology*, 2014, vol. 1, iss. 1, pp. S110 (1–6). <https://doi.org/10.15744/2348-9812.1.S110>
5. Ramana Reddy P., Ajith K. M., Udayashankar N. K. Effect of electrolyte concentration on morphological and photoluminescence properties of free standing porous anodic alumina membranes formed in oxalic acid. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2020, vol. 106, art. ID 104755. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104755>
6. Gorelik V. S., Yashin M. M., Dungxue Bi, Guang Tao Fei. Transmission Spectra and Optical Properties of a Mesoporous Photonic Crystal Based on Anodic Aluminum Oxide. *Optics and Spectroscopy*, 2018, vol. 124, iss. 2, pp. 167–173. <https://doi.org/10.1134/S0030400X18020078>
7. Gorelik V. S., Sverbil P. P., Filatov V. V., Dongxue Bi, Guang Tao Fei, Shao Hui Xu. Transmission spectra of one-dimensional porous alumina photonic crystals. *Photonics and Nanostructures – Fundamentals and Applications*, 2018, vol. 32, pp. 6–10. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2018.08.004>
8. Kushnir, S. E., Pchelyakova T. Yu., Napolskii K. S. Anodizing with voltage versus optical path length modulation: a new tool for the preparation of photonic structures. *Journal of Materials Chemistry*, 2018, vol. 6, no. 45, pp. 12192–12199. <https://doi.org/10.1039/C8TC04246B>
9. Chunxin Sun, Hao Shengzhen, Wang Zhijun, Xu Qin, Wang Yongguo, Peng Qi, Lan Tian. Rapid fabrication of iridescent alumina films supported on an aluminium substrate by high voltage anodization. *Optical Materials*, 2022, vol. 104, art. ID 109937. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.109937>

10. Segawa H., Wada K. Structural colors of laminated alumina films prepared by ac oxidation in oxalic acid solution. *Materials Chemistry and Physics*, 2020, vol. 250, art. ID 123031. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2020.123031>
11. Yurasov A. N., Yashin M. M. Effective medium theory as a tool for analyzing the optical properties of nanocomposites. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal* [Russian Technological Journal], 2018, vol. 6, no. 2, pp. 56–66 (in Russian). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2018-6-2-56-66>
12. Acosta L. K., Bertó-Roselló F., Xifre-Perez E., Law C. S., Santos A., Ferré-Borrull J., Marsa L. F. Tunable Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals by Gaussian Pulse Anodization. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2020, vol. 12, no. 17, pp. 19778–19787. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b23354>
13. Lim S. Y., Law C. S., Marsal L. F., Santos A. Engineering of Hybrid Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals by Heterogeneous Pulse Anodization. *Scientific Reports*, 2018, vol. 8, no. 1, art. ID 9455. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-27775-6>
14. Law C. S., Santos A., Nemati M., Losic D. Structural Engineering of Nanoporous Anodic Alumina Photonic Crystals by Sawtooth-like Pulse Anodization. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 2016, vol. 8, no. 21, pp. 13542–13554. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b03900>
15. Napolskii K. S., Noyan A. A., Kushnir S. E. Control of high-order photonic band gaps in one-dimensional anodic alumina photonic crystals. *Optical Materials*, 2020, vol. 109, art. ID 110317. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2020.110317>
16. Petukhov D. I., Napolskii K. S., Eliseev A. A. Permeability of anodic alumina membranes with branched channels. *Nanotechnology*, 2012, vol. 23, no. 33, p. 5601. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/23/33/335601>
17. Zaraska L., Stepiński W. J., Ciepiela E., Sulka G. D. The effect of anodizing temperature on structural features and hexagonal arrangement of nanopores in alumina synthesized by two-step anodizing in oxalic acid. *Thin Solid Films*, 2013, vol. 534, pp. 155–161. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.02.056>
18. Alekseev S. A., Lysenko V., Zaitsev V. N., Barbier D. Application of Infrared Interferometry for Quantitative Analysis of Chemical Groups Grafted onto the Internal Surface of Porous Silicon Nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2007, vol. 111, no. 42, pp. 15217–15222. <https://doi.org/10.1021/jp0712452>
19. Manzano C. V., Ramos D., Pethő L., Bürki G., Michler J., Philippe L. Controlling the Color and Effective Refractive Index of Metal-Anodic Aluminum Oxide (AAO)–Al Nanostructures: Morphology of AAO. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2017, vol. 122, no. 1, pp. 957–963. <https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b11131>
20. Gorelik V. S., Klimonsky S. O., Filatov V. V., Napolskii K. S. Optical properties of one-dimensional photonic crystals based on porous films of anodic aluminum oxide. *Optics and Spectroscopy C*, 2016, vol. 120, no. 4, pp. 534–539. <https://doi.org/10.1134/S0030400X16040081>
21. Sadykov A. I., Leontev A. P., Kushnir S. E., Lukashin A. V., Napolskii K. S. Kinetics of the Formation and Dissolution of Anodic Aluminum Oxide in Electrolytes Based on Sulfuric and Selenic Acids. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2021, vol. 66, no. 2, pp. 258–265. <https://doi.org/10.1134/S0036023621020182>

### Информация об авторах

Гасенкова Ирина Владимировна – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: gasenkova@oelt.basnet.by

Мухуров Николай Иванович – доктор технических наук, заведующий лабораторией, Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

Андрухович Ирина Михайловна – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Государственное научно-производственное объединение «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» (Логойский тракт, 22, 220090, Минск, Республика Беларусь). E-mail: irini.andrukhovich@gmail.com

### Information about the authors

Irina V. Gasenkova – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, State Scientific and Production Association “Optic, Optoelectronic and Laser Technique” (22, Logoiskii trakt, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: gasenkova@oelt.basnet.by

Nikolai I. Mukhurov – Dr. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory, State Scientific and Production Association “Optic, Optoelectronic and Laser Technique” (22, Logoiskii trakt, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: n.mukhurov@dragon.bas-net.by

Iryna M. Andrukhovich – Ph. D. (Engineering), Senior Researcher, State Scientific and Production Association “Optic, Optoelectronic and Laser Technique” (22, Logoiskii trakt, 220090, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irini.andrukhovich@gmail.com

**А. А. Бурин, В. Г. Залесский, И. Л. Поболь**

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

## УСТРАНЕНИЕ ДЕФЕКТОВ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В НИОБИЕВОМ СВЕРХПРОВОДЯЩЕМ РЕЗОНАТОРЕ

**Аннотация.** Исследованы возможные причины появления дефектов при сварке ниобиевого сверхпроводящего коаксиального полуволнового резонатора (HWR), которые заключаются в отклонении формы свариваемой поверхности от заданной, в отклонении угла падения луча от перпендикуляра к свариваемой поверхности, в колебании толщины свариваемых кромок, а также наличие некоторой нестабильности (пульсации) ускоряющего напряжения, токов луча и фокусировки электронно-лучевой пушки. Определены возможности предотвращения появления дефектов при сварке, заключающиеся в регулировании рабочих параметров электронно-лучевой пушки в зависимости от возможных погрешностей при изготовлении и подготовке свариваемых кромок. Изучены методы устранения дефектов при сварке ниобиевого сверхпроводящего коаксиального HWR. Разработан способ ремонта дефектов сварных соединений типа прожогов на исследуемом типе резонатора с использованием электронно-лучевого наплавления. Приведены результаты измерения резонансной частоты HWR до возникновения и после восстановления прожога, которые показали, что заплавление отверстия не привело к изменению электрофизических характеристик. Вакуумные и криогенные испытания при температуре жидкого азота подтвердили герметичность сварных соединений. Полученные результаты могут быть использованы при разработке базовых технологий восстановления и ремонта дорогостоящих и сложных в изготовлении элементов ускорительной техники – сверхпроводящих высококачественных резонаторов из листового особо чистого ниобия.

**Ключевые слова:** дефекты сварных соединений, ниобиевый резонатор, электронно-лучевое наплавление

**Для цитирования:** Бурин, А. А. Устранение дефектов сварного соединения в ниобиевом сверхпроводящем резонаторе / А. А. Бурин, В. Г. Залесский, И. Л. Поболь // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 18–23. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-18-23>

**Alexander A. Burin, Vitali G. Zaleski, Igor L. Pobol**

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

## ELIMINATION OF DEFECTS IN A WELDED JOINT IN A NIOBIUM SUPERCONDUCTING RESONATOR

**Abstract.** The possible reasons for the appearance of defects during welding of a niobium superconducting coaxial half-wave resonator (HWR) are investigated, which consist in the deviation of the shape of the welded surface from the given one, in the deviation of the angle of incidence of the beam from the perpendicular to the welded surface, in fluctuations in the thickness of the welded edges, and also the presence of some instability (pulsation) accelerating voltage, beam currents and focusing of the electron beam gun. The possibilities of preventing the appearance of defects during welding are determined, which consist in regulating the operating parameters of the electron beam gun depending on possible errors in the manufacture and preparation of the welded edges. Methods for elimination of defects in welding of niobium superconducting coaxial HWR are studied. A method has been developed for repairing defects in welded joints such as burn-throughs on the type of resonator under study using electron-beam deposition. The results of measuring the resonant frequency of the HWR before the onset and after the recovery of burn-through are presented, which showed that the melting of the hole did not lead to a change in the electrical characteristics. Vacuum and cryogenic tests at liquid nitrogen temperature confirmed the tightness of the welded joints. The results obtained can be used in the development of basic technologies for the restoration and repair of expensive and difficult-to-manufacture elements of accelerator technology – superconducting high-frequency resonators made of high-purity niobium sheet.

**Keywords:** defects in welded joints, niobium coaxial resonator, beam cladding

**For citation:** Burin A. A., Zaleski V. G., Pobol I. L. Elimination of defects in a welded joint in a niobium superconducting resonator. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 18–23 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-18-23>

**Введение.** Сверхпроводящие высокочастотные (СВЧ) резонаторы являются основными ускоряющими элементами современных ускорителей заряженных частиц, предназначенных для исследования физики частиц и высоких энергий. Для изготовления резонаторов используется ниобий высокой чистоты с содержанием примесей не более 100 ppm для металлов и не более 20 ppm для летучих элементов (O, H, N).

Производство СВЧ-резонаторов включает в себя несколько прецизионных технологических операций, при этом необходимо получить неразъемные соединения как отдельных элементов, так и готовой многоуровневой конструкции в целом. Сложности изготовления резонаторов заключаются в том, что к сварному соединению предъявляются высокие требования по чистоте материала, качеству внутренней и наружной рабочих поверхностей, герметичности, при этом высокая температура плавления ниобия (2469 °C) создает дополнительные технологические проблемы. Наибольшее соответствие всем указанным требованиям обеспечивает применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Кроме непосредственно ЭЛС соединяемые заготовки подвергаются неоднократным процедурам травления в смеси кислот и промывки деионизованной водой. В последнее десятилетие в Физико-техническом институте НАН Беларуси создана требуемая инфраструктура и накоплен определенный опыт производства сверхпроводящих резонаторов [1–3].

При сварке могут появляться следующие дефекты: неполное проплавление, чешуйчатость и высокая шероховатость поверхности шва, крупные капли и брызги металла на обратной поверхности сварного соединения [4, 5]. Для их устранения применяются методы электролитической или абразивной полировки внутренней поверхности резонатора или специальные механизмы. Значительной проблемой при сварке является появление такого дефекта, как прожог материала сварного шва. Вследствие высокой сложности изготовления и стоимости готового изделия (СВЧ-резонатора) актуальна разработка методики ремонта и восстановления дефектов, которые могут появиться в ходе сварки.

*Цель настоящей работы* – отработка методов устранения прожога в сварном шве после ЭЛС на примере ниобиевого сверхпроводящего коаксиального полуволнового резонатора.

**Возможные причины появления дефектов при сварке и методы их устранения.** При выборе режимов сварки необходимо учитывать, что для системы электропитания оборудования и функционирования электронно-лучевой пушки характерна некоторая нестабильность (пульсации) ускоряющего напряжения, токов луча и фокусировки. При формообразовании цилиндрических элементов возможно появление незначительной их эллипсности. Из-за этого при вращении заготовки вокруг оси может изменяться расстояние от пушки до поверхности свариваемых кромок. Кроме того, если при ЭЛС угол падения луча на свариваемый стык в ходе процесса отклоняется от 90°, то вследствие изменения соотношения отраженных от поверхности и поглощенных материалом электронов величина энерговклада изменяется. По причине неоднородной деформации в процессе формообразования толщина свариваемых кромок также колеблется, что обуславливает различия в условиях теплоотводов в разных участках резонатора и неполное соответствие условиям сварки экспериментального образца (ниобиевой трубы), применяемого при отработке оптимальных технологических режимов ЭЛС. Перечисленные причины могут приводить к отклонению глубины шва от требуемого значения и к определенной вероятности появления дефектов сварных соединений. В случае наиболее часто встречаемых устранимых дефектов (например, неполного проплавления) возникает необходимость повторного прохода электронным пучком, что в совокупности с указанными причинами усугубляет риск возникновения серьезных трудно устранимых дефектов – прожогов.

Возможность ремонта прожогов шва при помощи заглушек, вставляемых в отверстие прожога с последующей их переплавкой, показана в [4–9]. В [10] отмечается, что при изготовлении резонаторов для E-XFEL было отремонтировано 6 резонаторов с прожогами шва специально разработанной технологией.

**Оборудование и методика изготовления и ремонта резонаторов.** Для изготовления коаксиальных полуволновых резонаторов (рис. 1) применялся листовой ниобий толщиной 3 мм производства Ningxia OTIC (Китай). В процессе формообразования с использованием прессового оборудования при получении отдельных элементов резонатора фиксировалось варьирование толщины деформированных участков от 2,8 до 3,2 мм.

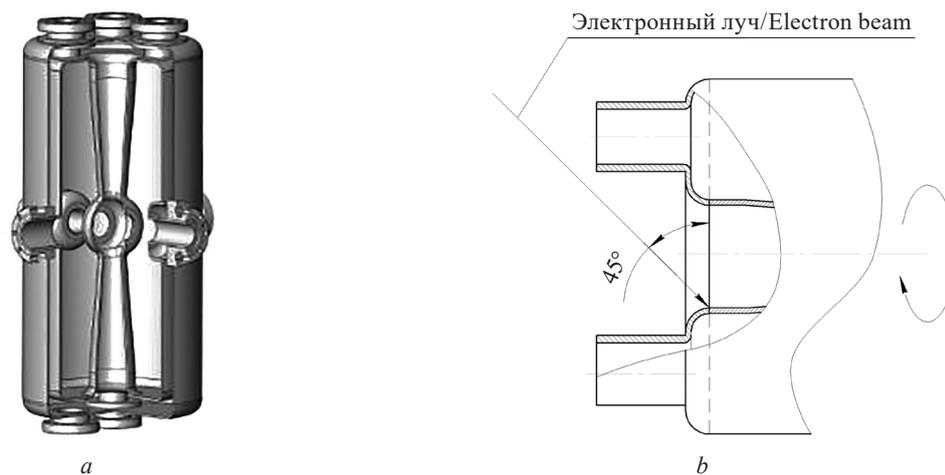


Рис. 1. Коаксиальный полуволновой резонатор в разрезе (а) и схема электронно-лучевой сварки внутреннего электрода с крышкой (b)  
 Fig. 1. Coaxial half-wave resonator in section (a) and diagram of the electron beam welding of the internal electrode with a cover (b)

ЭЛС резонаторов выполнялась на электронно-лучевой установке с ускоряющим напряжением 60 кВ и мощностью луча до 30 кВт. Для фиксации и позиционирования резонатора и образцов использовалась специальная оснастка из алюминия и нержавеющей стали. Отсутствие/наличие дефектов на наружной стороне сварного шва определяли путем визуального осмотра. Для осмотра обратной стороны шва использовался эндоскоп с фотофиксацией COANTEC P40 Series M3-6015.

ЭЛС резонатора проводилась комбинированным режимом с током фокусировки луча 627 мА при линейной развертке вдоль направления перемещения ванны 2 мм со смещением от стыка в сторону электронно-лучевой пушки 1,5 мм в несколько проходов по периметру цилиндрической поверхности. Первый проход: ток луча с силой тока 80 мА (в диапазоне угла поворота относительно оси луча 0–20° выполнялся набор тока, в диапазонах 20–380° – сварка, 380–425° – сброс тока до 0 мА); второй проход: ток луча с силой тока 165 мА (0–20° – набор тока, 20–380° – сварка (с падением тока от 165 мА (при 20°) до 163 мА (при 380°)), 380–425° – сброс тока до 0 мА).

При визуальном осмотре (с помощью эндоскопа) обратных сторон сварного соединения были обнаружены дефекты в виде непроваров. Для их устранения выполнялся повторный проход сварного шва. ЭЛС проводилась по следующему режиму: ток луча 168 мА, ток фокусировки 627 мА, линейная развертка вдоль направления перемещения ванны – 2 мм, смещение от стыка в сторону электронно-лучевой пушки – 1,5 мм. Технология сварки в таких условиях требует применения дополнительных технологических мер. Электронный луч попадал на поверхность под углом 45° (практически максимально возможный угол для данной конструкции), резонатор вращался вокруг центральной оси. Для уменьшения концентрации энергии использовался расфокусированный электронный луч (пятно нагрева имело наблюдаемый диаметр 5–6 мм). Установлено, что при падении луча под углом на свариваемых кромках пятно нагрева вытягивается в эллипс. Так, при угле 45° большая сторона эллипса составляет 1,4 от диаметра пятна нагрева при падении луча перпендикулярно поверхности. Для устранения эллипсности пятна нагрева использовалась линейная развертка электронного луча вдоль направления перемещения сварочной ванны с амплитудой 2 мм. Эксперименты по сварке под углом 45° без развертки не позволили определить оптимальные параметры сварки. Сварка под данным углом за один проход также не дала положительных результатов – они были получены при выполнении предварительного прохода с мощностью 50 % от номинального тока луча. При этом на одном из участков образовался прожог шва.

Для заварки прожога была изготовлена заглушка из ниобия толщиной 3 мм (рис. 2, а). Заготовка заглушки выполнена из листового материала (рис. 2, б) с радиусом изгиба 31 мм, что соответствует наружному диаметру внутреннего электрода – 62 мм.

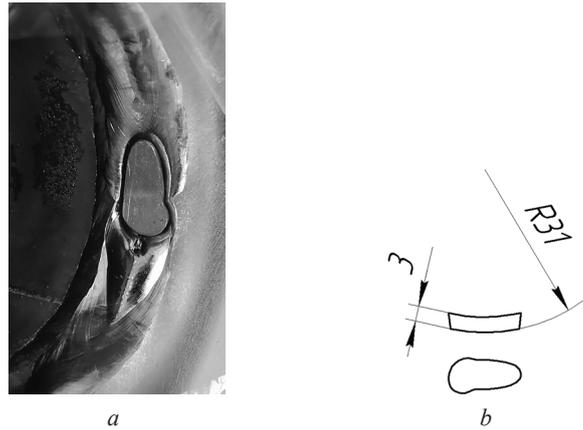


Рис. 2. Вид прожога в резонаторе с установленной заглушкой из ниобия (а) и схема заглушки (b)  
 Fig. 2. Type of burn-through in the resonator with a niobium plug installed (a) and a diagram of the plug (b)

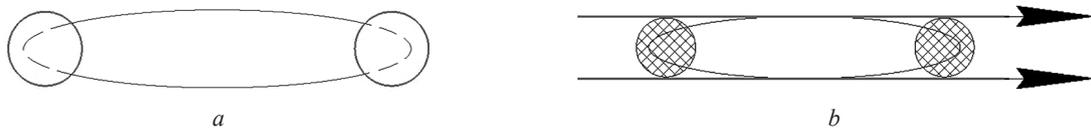


Рис. 3. Схемы первого (а) и второго (b) этапов заварки прожога  
 Fig. 3. Schemes of the first (a) and second (b) stages of welding burn

Методика заварки прожога отрабатывалась на модели в виде трубы близкого к резонатору диаметра из ниобия толщиной 3 мм. Из-за достаточно больших размеров прожога (6 × 10 мм) заварка осуществлялась в несколько этапов:

- 1) для точного позиционирования заглушки потребовались точечные прихватки по краям при токе фокусировки 627 мА и токе сварки 60 мА (рис. 3, а);
- 2) для пространственного ограничения растекания сварочной ванны и сплавления материала заглушки с основой проводились два параллельных прохода с неполным проплавлением со смещением к краям заглушки при токе фокусировки 627 мА и токе сварки 120 мА (рис. 3, b);
- 3) финальный проход по центру заглушки с полным проплавлением, ток фокусировки – 627 мА, ток сварки – 173 мА.

После финального прохода наблюдалось значительное уменьшение размера прожога (отверстие диаметром до 3 мм) и его смещение (вытягивание) вдоль сварного шва. Были подготовлены новые заглушки соответствующих размеров, и заварка происходила за один проход с полным проплавлением при сохранении изложенных выше этапов. В результате было получено полное устранение прожога с удовлетворительным качеством лицевой и обратной сторон сварного шва. Многократное повторение технологических операций на модельных прожогах позволило отработать технологию, подобрать оптимальные режимы и выполнить операцию по успешному восстановлению прожога на резонаторе (рис. 4).

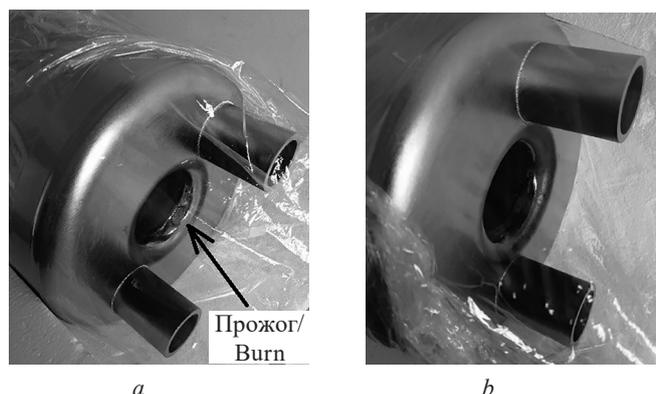


Рис. 4. Резонатор с прожегом (а) и после устранения дефекта (b)  
 Fig. 4. Resonator with a burn-through (a) and after the defect has been eliminated (b)

Измерение одного из ключевых параметров резонатора – резонансной частоты, до возникновения прожога (325,18 МГц) и после восстановления (325,074 МГц) показало, что заплавление отверстия не привело к изменению электрофизических характеристик, а проведенные вакуумные и криогенные испытания (при температуре жидкого азота и жидкого гелия) подтвердили герметичность сварных соединений и работоспособность резонатора в режиме сверхпроводимости.

**Заключение.** Разработанная технология и выбранные режимы электронно-лучевого наплавления и сварки для восстановления и ремонта ниобиевого сверхпроводящего коаксиального полуволнового резонатора позволили успешно устранить критические дефекты сварных соединений типа прожогов.

Представленные технологические режимы и результаты работы будут полезны при разработке базовых технологий восстановления и ремонта сложных в изготовлении и дорогостоящих элементов ускорительной техники, в частности сверхпроводящих высокочастотных резонаторов из листового особо чистого ниобия.

### Список использованных источников

1. Pobol, I. L. Developing of superconducting niobium cavities for accelerators / I. L. Pobol, S. V. Yurevich // J. Phys.: Conf. Series. – 2015 – Vol. 653, № 1. – Art. ID 012008. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012008>
2. Status of R&D on new superconducting injector linac for Nuclotron-NICA / A. V. Butenko [et al.] // 61<sup>st</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Daejeon, Korea, 17–22 June 2018: Proceedings. – Daejeon, 2018. – P. 83–87. <http://doi.org/10.18429/JACoW-HB2018-TUA2WC02>
3. Текущее состояние работ по созданию сверхпроводящих ускоряющих резонаторов для проекта Нуклотрон-Nica / М. А. Гусарова [и др.] // VII Междунар. конф. «Лазерные, плазменные исследования и технологии» (Лaplaz-2021), Москва, НИЯУ МИФИ, 24–26 марта 2021 г. – М., 2021. – С. 112–114.
4. IHEP low-loss large grain 9-cell cavity fabrication and processing / J. Gao [et al.] // 1<sup>st</sup> Intern. Particle Accelerator Conf. (IPAC'10), Kyoto, Japan, May 23–28, 2010: Proceedings. – Geneva, 2010. – P. 2974–2976.
5. ILC-higrade cavities as a tool of quality control for European XFEL / A. Navitski [et al.] // 16<sup>th</sup> Intern. Conf. on RF Superconductivity, SRF 2013, Paris, France, 23–27 September, 2013: Proceedings. – 2013. – P. 209–212.
6. Fabrication and testing of SSR1 resonators for PXIE / L. Ristori [et al.] // 4<sup>th</sup> Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC 2013, Shanghai, China, 12–17 May, 2013: Proceedings. – Geneva: JACOW, 2013. – P. 2429–2431.
7. Development and performance of 325 MHz single spoke resonators for Project X / L. Ristori [et al.] // 16<sup>th</sup> Intern. Conf. on RF Superconductivity, SRF 2013, Paris, France, 23–27 September 2013: Proceedings. – 2013. – P. 1187–1192.
8. KEK Production and investigation of superconducting 9-cell cavity made of large grain Nb in KEK / T. Dohmae [et al.] // 7<sup>th</sup> Intern. Particle Accelerator Conf., IPAC 2016, Busan, Korea, 8–13 May, 2016: Proceedings. – Geneva, 2016. – P. 2141–2144.
9. Experience with the fabrication, processing and testing of the prototype “C75” 5-cell cavities [Electronic resource] / G. Ciovati [et al.] // JLAB-TN-17-029, May 17, 2017. – Mode of access: [https://indico.jlab.org/event/251/attachments/2501/3068/FabricationProcessTesting\\_of\\_C75-JLAB-TN-17-029.pdf](https://indico.jlab.org/event/251/attachments/2501/3068/FabricationProcessTesting_of_C75-JLAB-TN-17-029.pdf) – Date of access: 22.10.2022
10. Production of superconducting 1.3-GHz cavities for the European X-ray Free Electron Laser / W. Singer [et al.] // Phys. Rev. Accel. Beams. – 2016. – Vol. 19. – Art. ID 092001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.092001>

### References

1. Pobol I. L., Yurevich S. V. Developing of superconducting niobium cavities for accelerators. *Journal of Physics: Conference Series*, 2015, vol. 653, no. 1, art. ID 012008. <http://doi.org/10.1088/1742-6596/653/1/012008>
2. Butenko A. V., Emelianov N. E., Sidorin A. O., Syresin E. M., Trubnikov G. V., Gusarova M. A., Kulevoy T. V., et al. Status of R&D on new superconducting injector linac for Nuclotron-NICA. *61<sup>st</sup> ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams, Daejeon, Korea, 17–22 June 2018: Proceedings*. Daejeon, 2018, pp. 83–87. <http://doi.org/10.18429/JACoW-HB2018-TUA2WC02>
3. Gusarova M. A., Lalayan M. V., Nemchenko R. E., Polozov S. M., Butenko A. V., Syresin E. M., Bychenok D. S., et al. Current state of work on the creation of superconducting accelerating cavities for the Nuclotron-Nica project. *VII Mezhdunarodnaya konferentsiya “Lazernye, plazmennye issledovaniya i tekhnologii” (Laplaz-2021), Moskva, NIYaU MIFI, 24–26 marta 2021 g.* [7<sup>th</sup> International Conference “Laser, Plasma Research and Technologies” (Laplaz-2021), Moscow, MEPhI Research Institute, March 24–26, 2021]. Moscow, 2021, pp. 112–114 (in Russian).
4. Gao J., Zhai J. Y., Li Z. Q., Zhao T. X., Dai J. P., Wang Q. Y., Guo Z. D., et al. IHEP low-loss large grain 9-cell cavity fabrication and processing. *1<sup>st</sup> International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto, Japan, May 23–28, 2010: Proceedings*. Geneva, 2010, pp. 2974–2976.
5. Navitski A., Elsen E., Foster B., Iversen J., Laasch R., Matheisen A., Reschke D., et al. ILC-higrade cavities as a tool of quality control for European XFEL. *16<sup>th</sup> International Conference on RF Superconductivity, SRF 2013, Paris, France, 23–27 September 2013: Proceedings*. 2013, pp. 209–212.

6. Ristori L., Awida M. H., Berrutti P., Khabiboulline T. N., Merio M., Passarelli D., Rowe A., Sergatskov D. A., Sukhanov A. I. Fabrication and testing of SSR1 resonators for PXIE. *4<sup>th</sup> International Particle Accelerator Conference, IPAC 2013, Shanghai, China, 12–17 May, 2013: Proceedings*. Geneva, JACOW, 2013, pp. 2429–2431.

7. Ristori L., Awida M. H., Berrutti P., Ginsburg C. M., Gonin I. V., Khabiboulline T. N., Merio M., et al. Development and performance of 325 MHz single spoke resonators for Project X. *16<sup>th</sup> International Conference on RF Superconductivity, SRF 2013, Paris, France, 23–27 September 2013: Proceedings*, 2013, pp. 1187–1192.

8. Dohmae T., Inoue H., Umemori K., Watanabe Y., Yamanaka M. KEK Production and investigation of superconducting 9-cell cavity made of large grain Nb in KEK. *7<sup>th</sup> International Particle Accelerator Conference, IPAC 2016, Busan, Korea, 8–13 May, 2016: Proceedings*. Geneva, 2016, pp. 2141–2144.

9. Ciovati G., Anderson A., Clemens W., Combs D., Davis K., Dail J., Dreyfuss C., et al. Experience with the fabrication, processing and testing of the prototype “C75” 5-cell cavities. *JLAB-TN-17-029, May 17, 2017*. Available at: [https://indico.jlab.org/event/251/attachments/2501/3068/FabricationProcessTesting\\_of\\_C75-JLAB-TN-17-029.pdf](https://indico.jlab.org/event/251/attachments/2501/3068/FabricationProcessTesting_of_C75-JLAB-TN-17-029.pdf) (accessed 22 October 2022).

10. Singer W., Brinkmann A., Brinkmann R., Iversen J., Matheisen A., Moeller W.-D., Navitski A., et al. Production of superconducting 1.3-GHz cavities for the European X-ray Free Electron Laser. *Physical Review Accelerators and Beams*, 2016, vol. 19, art. ID 092001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevAccelBeams.19.092001>

### Информация об авторах

*Бурин Александр Алексеевич* – научный сотрудник, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-0143-3962>. E-mail: [burin1992@mail.ru](mailto:burin1992@mail.ru)

*Залесский Виталий Геннадьевич* – доктор физико-математических наук, директор, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [v.zallesski@phti.by](mailto:v.zallesski@phti.by)

*Поболь Игорь Леонидович* – доктор технических наук, профессор, начальник отдела, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича 10, 220084, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-4487-7245>. E-mail: [pobol@phti.by](mailto:pobol@phti.by)

### Information about the authors

*Alexander A. Burin* – Researcher, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-0143-3962>. E-mail: [burin1992@mail.ru](mailto:burin1992@mail.ru)

*Vitali G. Zaleski* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [v.zallesski@phti.by](mailto:v.zallesski@phti.by)

*Igor L. Pobol* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences (10, Academician Kuprevich Str., 220084, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-4487-7245>. E-mail: [pobol@phti.by](mailto:pobol@phti.by)

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

УДК 62-254:629.11.01(047.31)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-24-31>

Поступила в редакцию 23.06.2022

Received 23.06.2022

**С. Н. Янкевич, И. Н. Хроль, Н. А. Калиновский***Приборостроительный завод «Оптрон», Минск, Республика Беларусь***ОЦЕНКА ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ПЕРСОНАЛЬНОГО ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА**

**Аннотация.** Изучены свойства материалов для безвоздушного колесного движителя транспортных средств, в том числе электрических. Выполнено экспериментальное обоснование выбора типа полимерных матриц и составов армирующих наполнителей для изготовления безвоздушного колесного движителя электротранспортных средств. Для проведения испытаний базовой эпоксидной матрицы часть образцов без добавления армирующих волокон отверждалась при комнатной температуре (L-285H), а остальные (L-285G) – при нагреве до 60 °С. В целях улучшения прочностных характеристик эпоксидной матрицы L-285G проводили армирование стеклоровингом EC16 1600T-16(400). Матрицей для выполнения образцов на базе литьевых полиуретанов был выбран Smooth-Cast 300 Series. Из базового полиуретана изготовлены образцы при различных условиях: при атмосферном отвержении (SC), под вакуумом –81,1 кПа (SC-0.8) и при отверждении с наложением вибрации (SCV). Проведены сравнительные испытания, которые показали отличия механических свойств базовых матриц на базе эпоксидных смол и литьевых полиуретанов, в частности относительное удлинение образцов из литьевого полиуретана более чем в 2 раза. Установлено, что в качестве демпфирующих элементов наиболее рационально применение литьевого полиуретана, а материала изготовления спиц-демпферов – композита SCV-S-20. Изготовление изделий из полученного композита целесообразно проводить при наложении на форму вибраций и с предварительным вакуумированием при вакууме 81,1 кПа компонентов полиуретановой матрицы, что позволяет снизить количество внутренних дефектов в виде раковин. Вакуумирование изделия при полимеризации не дает значимого эффекта ввиду наличия в базовой матрице комплекта специализированных деаэрационных присадок, поэтому предложено проводить его при постоянном контроле, так как превышение вакуума в пределах от 81,1 до 91,2 кПа влечет разложение отдельных компонентов матрицы с образованием пены.

**Ключевые слова:** электрическое транспортное средство, безвоздушное колесо с внутренним демпфированием, композиционные материалы, полиуретан, армирующие наполнители

**Для цитирования:** Янкевич, С. Н. Оценка прочностных характеристик полимерных материалов для изготовления элементов персонального электротранспорта / С. Н. Янкевич, И. Н. Хроль, Н. А. Калиновский // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 24–31. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-24-31>

**Stsiapan N. Yankevich, Igor N. Khrol, Nikita A. Kalinovskij***JSC “Instrument-Making Plant Optron”, Minsk, Republic of Belarus***EVALUATION OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF POLYMER MATERIALS  
FOR THE MANUFACTURE OF PERSONAL ELECTRIC VEHICLE ELEMENTS**

**Abstract.** The properties of materials for airless wheel propulsion of vehicles, including electric ones, have been studied. The experimental substantiation of the choice of the type of polymer matrices and compositions of reinforcing fillers for the manufacture of an airless wheel mover of electric vehicles has been carried out. To test the basic epoxy matrix, part of the samples without the addition of reinforcing fibers was cured at room temperature (L-285H), and the rest (L-285G) – when heated to 60 °C. In order to improve the strength characteristics of the epoxy matrix L-285G, glass reinforcement was carried out with EC16 1600T-16(400) glass reinforcement. The Smooth-Cast 300 Series was chosen as the matrix for performing samples based on injection-molded polyurethanes. Samples are made of base polyurethane under various conditions: at atmospheric rejection (SC), under vacuum 0.8 kPa (SC-0.8) and during vibration-induced curing (SCV). Comparative tests were carried out, which showed differences in the mechanical properties of the base matrices based on epoxy resins and injection-molded polyurethanes, in particular, the relative elongation of samples from injection-molded polyurethane by more than 2 times. It is established that the most rational use of injection-molded polyurethane is application as damping elements, and the material for manufacturing spokes dampers is composite SCV-S-20. It is advisable to manufacture products from the resulting composite when vibrations are applied to the mold and with preliminary vacuuming at a vacuum of 0.8 kPa of the components of the polyurethane matrix, which reduces the number of internal defects in the form of shells. Since vacuuming of the product during polymerization does not give a significant effect due to the presence of a set of specialized deaeration additives in the base matrix, it is proposed to carry it out under constant control, since exceeding the vacuum in the range from 0.8 to 0.9 kPa entails decomposition of individual matrix components with foam formation.

**Keywords:** electric vehicle, airless wheel with internal damping, composite materials, polyurethane, reinforcing fillers

**For citation:** Yankevich S. N., Khrol I. N., Kalinovskij N. A. Evaluation of the strength characteristics of polymer materials for the manufacture of personal electric vehicle elements. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 24–31 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-24-31>

**Введение.** Одним из популярных в настоящее время видов индивидуального средства передвижения является электросамокат. Его принцип действия заключается в том, что аккумуляторная батарея приводит в действие электродвигатель, параметры работы которого зависят от заводских настроек. Чем мощнее двигатель, тем больше грузоподъемность и скорость самоката. В целом же принято условное деление: самокаты с мощностью до 250 Вт подходят для людей массой до 80 кг, при большей массе следует использовать самокат с мощностью выше 250 Вт.

Оптимальным диаметром колес для самоката считается 8 дюймов. Самокат с такими колесами достаточно универсален: на нем можно ездить не только по асфальту, но и по грунту. Кроме того, чем меньше диаметр колес, тем, как правило, слабее двигатель. Масса средней модели с такими колесами составляет ~ 13 кг. Электрические самокаты с колесами диаметром 8 дюймов обычно без проблем помещаются в багажник автомобиля.

В настоящее время 8-дюймовые колеса комплектуются пневматическими шинами, которые, обладая рядом преимуществ, имеют существенные недостатки, связанные с наличием давления воздуха внутри. В безвоздушных колесах гибкие упругие элементы выполняют функции воздуха в пневматических шинах.

Применение безвоздушного колеса дает возможность получения оптимального уровня показателей электротранспорта. Несущая способность безвоздушного колесного движителя в значительной мере определяется жесткостными характеристиками упругих элементов, прежде всего радиальной жесткостью.

Очевидно, что реализация внутреннего демпфирования неразрывно связана в первую очередь с оптимизацией формы спиц безвоздушного колеса: применяемые спицы дугообразной формы или спицы, представляющие собой аналог сотовой структуры, являясь решением проблемы, тем не менее не реализуют полностью существующих возможностей для решения задачи.

В качестве приемлемого решения может быть принято конструктивное исполнение спиц в виде витых пружин S-образной формы. Данное решение продиктовано необходимостью обеспечения боковой жесткости колеса при минимальном количестве деталей и узлов изделия. Витые пружины в подобных конструкциях выполняют функцию бокового ребра жесткости. Учитывая данные обстоятельства, особое значение приобретает материал для изготовления безвоздушного колеса. Так, в [1] исследованы обладающие повышенными механическими свойствами полимерные композиционные материалы на основе полиуретанов для производства электротранспортных средств. В [2] рассмотрено применение полимерного материала на основе стеклопластика, упрочненного стеклянными наполнителями.

Исходя из этого, выбор материала для колесного движителя электросамоката с оптимальными качествами становится весьма актуальным.

*Цель исследования* – экспериментальное обоснование выбора типа полимерных матриц и составов армирующих наполнителей для изготовления безвоздушных колесных движителей электротранспортных средств.

**Схема исследований.** Представление безвоздушного колеса как сложной системы (рис. 1) позволяет, с одной стороны, расчленив его проектирование на этапы, с другой – учесть существующие связи между подсистемами, определяющими его работоспособность. Вместе с тем излишняя детализация и конкретизация может не только значительно затруднить, но и сделать подобный анализ практически невозможным. Поэтому следует констатировать, что при моделировании такой системы нецелесообразно создавать одну универсальную модель, которая могла бы воспроизводить как действие системы в целом, так и отдельных ее подсистем.

Как видно из рис. 1, можно выделить отдельный элемент конструкции колеса – спицу-демпфер (рис. 2, *a*), и проводить дальнейшие исследования и расчеты относительно ее механических свойств (рис. 2, *b*).



Рис. 1. Модель системы «Безвоздушное колесо»  
 Fig. 1. Model of the “Airless wheel” system

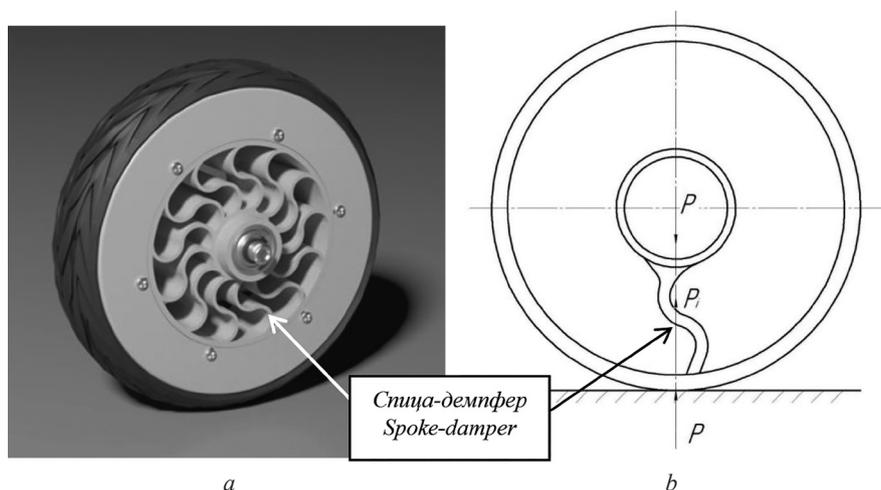


Рис. 2. Внешний вид безвоздушного колеса (a) и схема нагружения безвоздушной шины с упругими элементами радиальной нагрузкой  $P$  (b)  
 Fig. 2. The appearance of an airless wheel (a), and the loading scheme of an airless tire with elastic elements with a radial load  $P$  (b)

Для проведения испытаний были изготовлены образцы согласно ГОСТ 11 262-2017 (ISO 527-2:2012) «Пластмассы. Метод испытания на растяжение». Исследование механических свойств образцов материала проводили на разрывной электромеханической испытательной машине WDW-100E (TIME Group Inc., Китай) с максимальной нагрузкой 100 кН. Для крепления образца в разрывной машине использованы универсальные клиновидные захваты. Деформация образцов во всех экспериментах осуществлялась с постоянной скоростью 2 мм/мин. Удлинение определялось по ходу траверсы.

Для выполнения сравнительных испытаний часть образцов была выполнена с матрицей из эпоксидной смолы L-285, технические характеристики которой представлены в табл. 1.

Эпоксидная смола L-285 предназначена для производства планеров, мотопланеров и моторных самолетов, катеро- и судостроения, изготовления спортивного инвентаря, моделей самолетов, пресс-форм и инструментов. Применяется с различными наполнителями (стекловолокно, углеткань и арамидные волокна). После термообработки при температуре от 50 до 55 °С композит на основе этой смолы соответствует стандартам для планеров и моторных планеров (рабочие температуры от –60 до +54 °С). Для соответствия стандартам для моторных самолетов (рабочие температуры от –60 до +72 °С) требуется термическая обработка при 80 °С.

Т а б л и ц а 1. Технические характеристики эпоксидной смолы L-285

T a b l e 1. Technical characteristics of epoxy resin L-285

Техническая характеристика	Стандарт	Значение
Плотность, г/см <sup>3</sup>	DIN EN 610 001 183-1	1,18–1,20
Модуль упругости, ГПа	DIN EN ISO 178	3,0–3,3
Удлинение при разрыве, %	DIN EN ISO 527-2	5,0–6,5
Прочность на изгиб, МПа	DIN EN ISO 178	110–120
Предел прочности на сжатие, МПа	DIN EN ISO 604	120–140
Предел прочности на разрыв, МПа	DIN EN ISO 527-2	70–80
Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>	SO 179-1	45–55

П р и м е ч а н и е. Отверждение составило 24 ч при 23 °С + 15 ч при 60 °С.

Для проведения испытаний базовой матрицы было изготовлено шесть образцов без добавления армирующих волокон, три из них отверждались при комнатной температуре (L-285H), а остальные (L-285G) – при нагреве до 60 °С.

Во второй части опытов для изготовления образцов использовали литьевой полиуретан. Это универсальный современный конструкционный синтетический материал, который благодаря своим особым эксплуатационным свойствам используется в качестве замены различных марок резины, каучуков, металла, пластика во многих отраслях промышленности.

Полиуретановые стержни, листы, другие изделия по своим техническим характеристикам во многом превосходят резины, обычные пластические массы, каучуки, даже металл, благодаря чему открываются новые возможности применения, а потребление данной продукции с каждым годом значительно возрастает.

Матрицей для выполнения образцов на базе литьевых полиуретанов выбран Smooth-Cast 300 Series – жидкий синтетический полимер, который обладает очень низкой вязкостью 0,08 Па·с.

Данный продукт обладает высокой влагостойкостью и устойчивостью к воздействию слабых растворителей. Технические характеристики литьевого полиуретана Smooth-Cast 300 Series приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Технические характеристики литьевого полиуретана Smooth-Cast 300 Series [6]

T a b l e 2. Technical characteristics of injection molded polyurethane Smooth-Cast 300 Series [6]

Техническая характеристика	Smooth-Cast 300	Smooth-Cast 305	Smooth-Cast 310
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,05		
Модуль упругости на растяжение, МПа	961,8	923,9	
Модуль упругости на изгиб, МПа	882,5	813,6	
Удлинение при разрыве, %	5	7,5	
Предел прочности на изгиб, МПа	31,1	27,58	
Предел прочности на сжатие, МПа	27,58	26,2	
Предел прочности на разрыв, МПа	20,68		
Время отверждения (зависит от массы), мин	10	30	180–240

Аналогично образцам из эпоксидной смолы были изготовлены образцы из базового полиуретана при различных условиях: при атмосферном отвержении (SC), под вакуумом – 81,1 кПа (SC-0.8) и при отверждении с наложением вибрации (SCV).

Для армирования производилась добавка в литьевой полиуретан стеклоровинга (SCV-S-20 и SCV-S-10), углеволоконного ровинга (SCV-U-20 и SCV-U-10) и углеволокна (SCV-U).

**Результаты исследований и их обсуждение.** Результаты испытаний образцов из эпоксидной смолы L-285 без добавления армирующих волокон представлены в табл. 3.

Как можно видеть из приведенных результатов, нагрев до 60 °С позволяет увеличить прочность получаемой базовой матрицы на 18 % при улучшении ее текучести (рис. 3). По этой причине последующее изготовление армируемых образцов производилось на базе матрицы L-285G.

Таблица 3. Результаты испытаний базовой матрицы эпоксидной смолы L-285

Table 3. Test results of the basic matrix of epoxy resin L-285

Образец	Предел прочности на растяжение, МПа
L-285H-1	60,6
L-285H-2	48,2
L-285H-3	35
L-285G-1	53,03
L-285G-2	48,46
L-285G-3	74,06

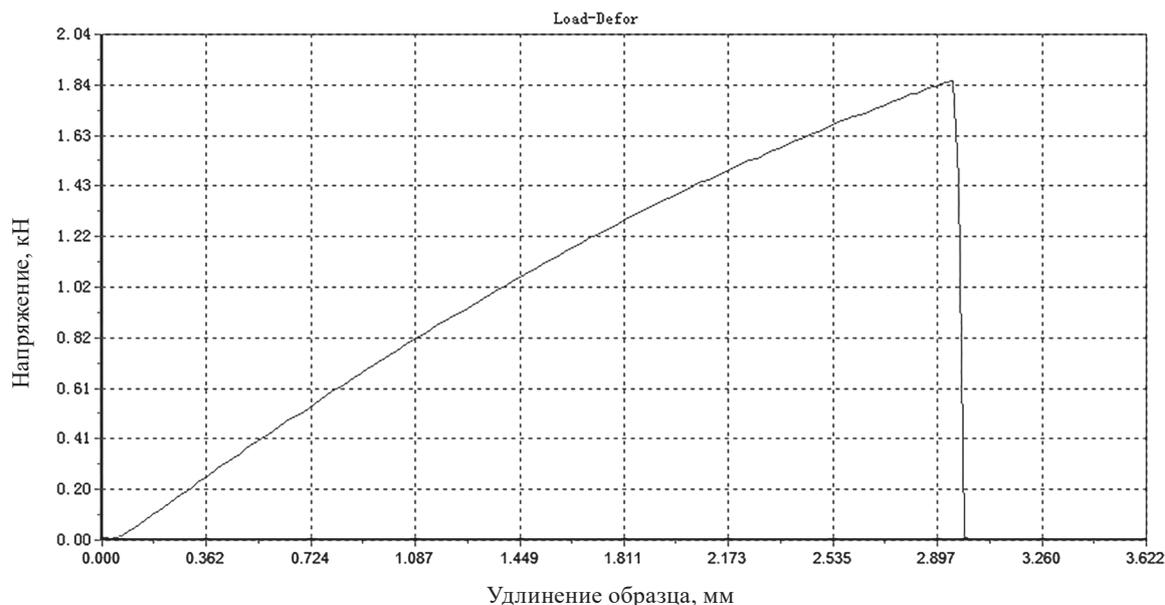


Рис. 3. Диаграмма растяжения матрицы L-285G

Fig. 3. The stretching diagram of the matrix L-285G

Представленный на рис. 3 график на начальной стадии эксперимента имеет практически прямолинейный участок, который соответствует чисто упругой деформации, описываемой законом Гука. В середине графика происходит резкое уменьшение наклона кривой (уменьшение модуля  $E$ ), что свидетельствует о достижении критических напряжений и изменении механизма деформации.

Данный процесс можно пояснить тем, что после процесса полимеризации полимерные цепи реактопластов образуют сетчатые полимеры [3]. Сама сетка получается за счет структурирования (сшивки) цепей в узлы. Эти узлы имеют разную природу образования (химическую, физическую и топологическую) и обуславливают поведение эпоксиды при разрушении. Например, физические узлы образованы за счет электростатических, ван-дер-ваальсовых и водородных связей. Ввиду низкой прочности данных узлов эпоксиды при нагрузке могут переходить в вязкотекучее состояние и кратковременно проводить «самозалечивание» с перестройкой внутримолекулярной структуры, пока эти связи не разрушатся [4, 5].

В целях улучшения прочностных характеристик эпоксидной матрицы L-285G проводили армирование стеклоровингом ЕС16 1600Т-16(400), который представляет собой первичный продукт производства стеклокомпозитов, получаемый из расплавленного алюмоборосиликатного стекла (вытягивается волокнами диаметром 10–20 мк каждое). Если смола разрушается хрупко при достижении некоторого фиксированного значения механического напряжения (предел прочности), то композит разрушается постепенно (рис. 4), поэтому величина предела прочности становится не вполне определенной, исходя из того, что разрушение материала происходит путем разрыва волокон, а также через образование продольных и поперечных трещин в смоле и между волокнами [5].

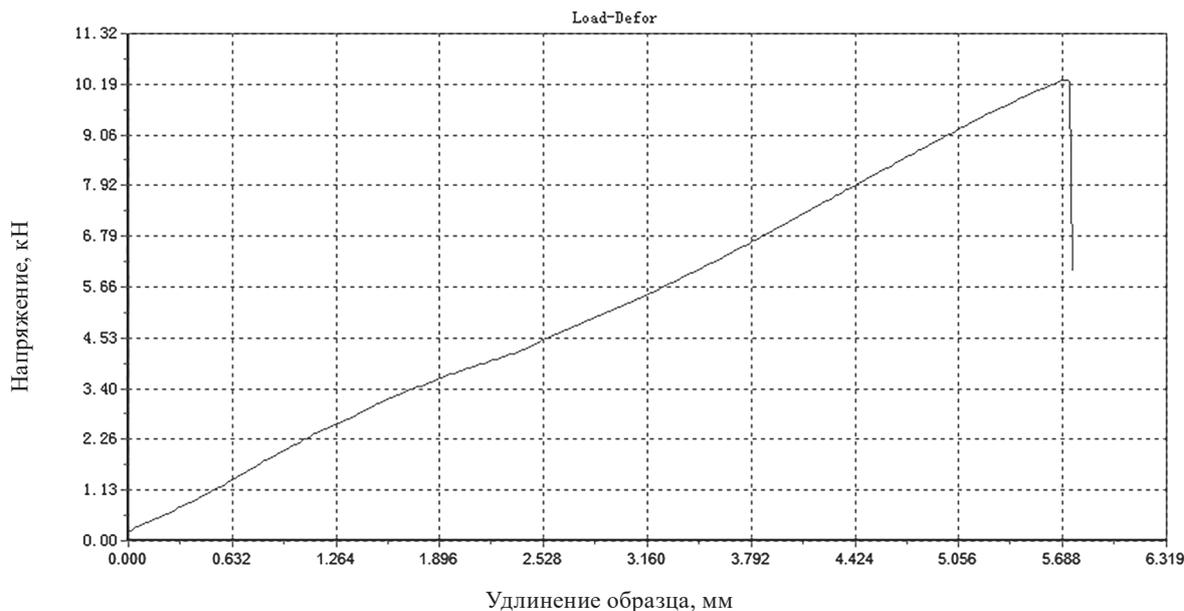


Рис. 4. Диаграмма растяжения композита L-285G-20  
Fig. 4. The stretching diagram of the composite L-285G-20

Значения предела прочности на растяжение композитов на матрице L-285, армированных стеклоровингом в 10 сложенный (L-285G-10), 15 (L-285G-15) и 20 сложенный (L-285G-20), приведены в табл. 4. Как видно максимальное значение получено у образца L-285G-20 и равно 358,9 МПа, а минимальное – у образца L-285G-10 – 294,8 МПа.

Таблица 4. Результаты испытаний композитов на матрице L-285

Table 4. Test results of composites on the L-285 matrix

Образец	Предел прочности на растяжение, МПа
L-285G-20	358,97
L-285G-20	333,79
L-285G-15	326,4
L-285G-15	302,3
L-285G-10	316,6
L-285G-10	294,8

Результаты испытаний литьевого полиуретана Smooth-Cast 300 Series при различных условиях: при атмосферном отверждении (SC), под вакуумом (SC-0.8, давление вакуума – 81,1 кПа) и при отверждении с наложением вибрации (SCV), – представлены в табл. 5.

Таблица 5. Результаты испытаний матрицы Smooth-Cast 300 Series

Table 5. Test results of the Smooth-Cast 300 Series matrix

Образец	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Ударная вязкость по Шарпи без надреза, кДж/м <sup>2</sup>
SC-0.8	16,6	472	15
SC	15,3	384	20
SCV	22,9	572	40

Из полученных результатов видно, что наложение вибрации позволяет увеличить прочность получаемой базовой матрицы на 30 %. Это связано с достаточно высокой вязкостью базовых компонентов, что приводит к образованию внутренних дефектов в виде раковин. Наложение вибрации при отверждении вызывает процесс дегазации с отделением пузырей от стенок формы. По этой причине дальнейшее изготовление армируемых образцов производилось на базе матрицы SCV.

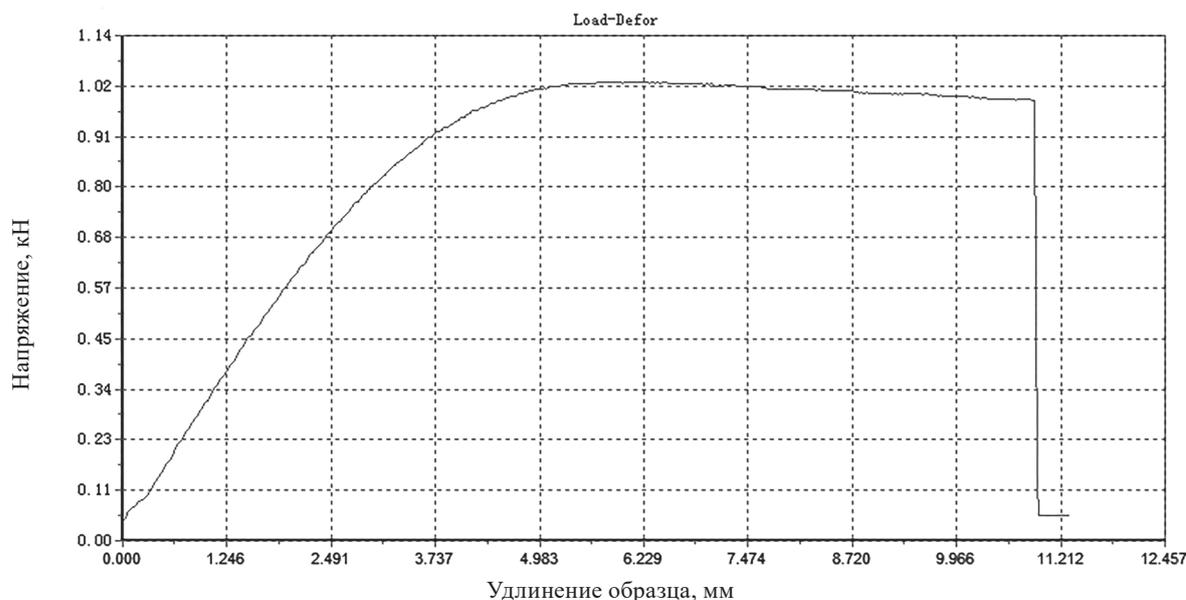


Рис. 5. Диаграмма растяжения композита SCV

Fig. 5. SCV composite stretching diagram

Диаграмма растяжения композита SCV представлена на рис. 5. На кривой зависимости между напряжением и деформацией просматриваются следующие характерные участки. В начале приложения усилия происходит рост напряжения, что свойственно для упругой деформации, описываемой законом Гука. В середине графика происходит незначительное снижение напряжения, а затем в материале происходит надрыв основного сечения (уменьшение модуля  $E$ ), что свидетельствует об изменении механизма деформации [6, 7].

Следующий этап исследований литевых полиуретанов заключался в проведении испытаний на армированных образцах.

Результаты испытаний композитов на матрице Smooth-Cast 300 Series, армированных стекло-роvingом (SCV-S-20 и SCV-S-10), углеволокном роvingом (SCV-U-20 и SCV-U-10) и углеволокном (SCV-U), приводятся в табл. 6. Лучшие результаты по пределу прочности (65,7 МПа) показал композит SCV-S-20, также у данного композита хорошие показатели модуля упругости (2191 МПа) и ударной вязкости по Шарпи (20 кДж/м<sup>2</sup>), худшие – у SCV-U (соответственно 1230 МПа и 10 кДж/м<sup>2</sup>).

Таблица 6. Результаты испытаний композитов на матрице Smooth-Cast 300 Series

Table 6. Test results of composites on a Smooth-Cast 300 Series matrix

Образец	Предел прочности на растяжение, МПа	Модуль упругости, МПа	Ударная вязкость по Шарпи без надреза, кДж/м <sup>2</sup>
SCV-S-10	51,4	1580	15
SCV-S-20	65,7	2191	20
SCV-U-10	45,8	1600	10
SCV-U-20	44,4	2270	15
SCV-U	26,3	1230	10

**Заключение.** В ходе проведенных сравнительных испытаний композиционных материалов на основе литевых полиуретанов и эпоксидных смол установлены отличия механических свойств их матриц. Стоит отметить увеличенное более чем в 2 раза относительное удлинение образцов из литевого полиуретана.

По мнению авторов, для целевого применения в качестве материала демпфирующих элементов безвоздушных шин целесообразно применение композита SCV-S-20 ввиду на порядок большего, по сравнению с базовой матрицей, модуля упругости и предела прочности.

## Список использованных источников

1. Янкевич, С. Н. Механические свойства композиционных материалов на основе полиуретанов = Mechanical properties of composite polyurethane-based materials / С. Н. Янкевич, А. Д. Гладинов // *Металлургия: респ. межведомств. сб. науч. тр. / редкол.: И. А. Иванов (гл. ред.) [и др.]*. – Минск: БНТУ, 2022. – Вып. 43. – С. 173–184.
2. Карташов, А. Б. Применение композиционных материалов в конструкции ходовой части городского автомобиля / А. Б. Карташов // *Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева*. – 2010. – № 3. – С. 155–159.
3. Структурные уровни разрушения эпоксидных композитных материалов при ударном нагружении / П. Д. Стухляк [и др.] // *Физ. мезомеханика*. – 2014. – Т. 17, № 2. – С. 65–83.
4. Research on non-pneumatic tire with gradient anti-tetrachiral structures / Wu Taoyu [et al.] // *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. – 2021. – Vol. 28, № 22. – P. 2351–2359. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1734888>
5. Size matters – The shell lander concept for exploring medium-size airless bodies / C. D. Grimm [et al.] // *Acta Astronautica*. – 2020. – Vol. 173. – P. 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.002>
6. Hryciów, Z. The Influence of Non-Pneumatic Tyre Structure on its Operational Properties / Z. Hryciów, J. Jackowski, M. Żmuda // *Intern. J. Automotive Mech. Eng.* – 2020. – Vol. 17, iss. 3. – P. 8168–8178. <https://doi.org/10.15282/ijame.17.3.2020.10.0614>
7. Considering the stress concentration of fiber surfaces in the prediction of the tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic composites / Go Yamamoto [et al.] // *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. – 2019. – Vol. 121. – P. 499–509. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.011>

## References

1. Yankevich S. N., Gladinov A. D. Mechanical properties of composite polyurethane-based materials. *Metallurgiya: resp. mezhvedomst. sb. nauch. tr.* [Metallurgy: Republican Interdepartmental Collection of Scientific Papers]. Minsk, Belarusian National Technical University, 2022, issue 43, pp. 173–184 (in Russian).
2. Kartashov A. B. The use of composite materials in the design of the chassis of a city car. *Trudy NGTU im. R. E. Alexeeva = Transactions of Nizhni Novgorod State Technical University n.a. R.Y. Alexeev*, 2010, no. 3, pp. 155–159 (in Russian).
3. Stukhlyak P. D., Buketov A. V., Panin S. V., Marushchak P. O., Moroz K. M., Poltaranin M. A., Vukherer T., et al. Structural levels of destruction of epoxy composite materials under shock loading. *Fizicheskaya mezomekhanika* [Physical Mesomechanics], 2014, vol. 17, no. 2, pp. 65–83 (in Russian).
4. Taoyu Wu, Mingxuan Li, Xiaolei Zhu, Xiaofeng Lu. Research on non-pneumatic tire with gradient anti-tetrachiral structures. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021, vol. 28, no. 22, pp. 2351–2359. <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1734888>
5. Grimm C. D., Witte L., Schröder S., Wickhusen K. Size matters – The shell lander concept for exploring medium-size airless bodies. *Acta Astronautica*, 2020, vol. 173, pp. 91–110. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.02.002>
6. Hryciów Z., Jackowski J., Żmuda M. The Influence of Non-Pneumatic Tyre Structure on its Operational Properties. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 2020, vol. 17, iss. 3, pp. 8168–8178. <https://doi.org/10.15282/ijame.17.3.2020.10.0614>
7. Go Yamamoto, Miho Onodera, Keita Koizumi, Jun Watanabe, Haruki Okuda, Fumihiko Tanaka, Tomonaga Okabe. Considering the stress concentration of fiber surfaces in the prediction of the tensile strength of unidirectional carbon fiber-reinforced plastic composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2019, vol. 121, pp. 499–509. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.04.011>

## Информация об авторах

Янкевич Степан Николаевич – заместитель генерального директора по инновационной деятельности, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nio@optron.by

Хроль Игорь Николаевич – начальник научно-исследовательского отдела, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: igor\_aspirant\_fmm@mail.ru

Калиновский Никита Александрович – младший научный сотрудник, ОАО «Приборостроительный завод «Оптрон» (ул. Ф. Скорины, 52, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: kirillf57@gmail.com

## Information about the authors

Stsiapan N. Yankevich – Deputy Director General for Innovation, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nio@optron.by

Igor N. Khrol – Head of the Scientific Department, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: igor\_aspirant\_fmm@mail.ru

Nikita A. Kalinovskij – Junior Researcher, JSC “Instrument-Making Plant “Optron” (52, F. Skorina Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: kirillf57@gmail.com

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**UDC 622.273.18.02  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-32-39>Received 02.08.2022  
Поступила в редакцию 02.08.2022**Michael A. Zhuravkov<sup>1</sup>, Andrey B. Petrovskiy<sup>2</sup>, Viktor Ya. Prushak<sup>3</sup>,  
Mikhail A. Nikolaitchik<sup>1</sup>, Dmitry A. Puzanov<sup>4</sup>, Nikita M. Klimkovich<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus,*<sup>2</sup>*JSC “Belaruskali”, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus,*<sup>3</sup>*Soligorsk Institute of Resources Saving Problems with Pilot Production, Soligorsk,  
Minsk Region, Republic of Belarus,*<sup>4</sup>*Institute of Mining, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus***MODELING OF THE GEOMECHANICAL STATE  
OF THE ROCK MASSIFS BEING UNDERMINED REPEATEDLY**

**Abstract.** The geomechanical model is proposed and the technology of numerical simulation is developed. Carried out computer simulation of the geomechanical state of the being undermined repeatedly rock massifs of the 3<sup>rd</sup> potash level of the Starobin deposit taking into account its structural and strength features, as well as the technological schemes of the primary mining. The regularities of the stress-strain zones formation in the undermined rock mass containing mined out mine workings and inter-panel pillars were determined. It is shown that the stability of the workings located in the undermined areas significantly depends on the time passed since the primary mining and on the location of the workings in the massif relative to the location of the primary mining operations. It is determined that the most dangerous for repeated mining are the areas of generalized shear, since the processes of rock mass movement and failure are most likely to be active in these areas. In the areas of generalized compression, the processes of compaction of caved rock take place. As a consequence, after a considerable period of time, the state of the rock massif in these areas can be treated as approximating to the natural state, without additional structural failures. In such areas, the effective mechanical characteristics of the rock massifs are practically restored. Therefore, the greatest stability of mine workings will be achieved when they are placed in the area of generalized compression stress state in the zone of caved, compacted rocks of the mined out roadways and faces.

**Keywords:** geomechanical model, stress-strain state, ultimate state criteria, rock massif, working**For citation:** Zhuravkov M. A., Petrovskiy A. B., Prushak V. Ya., Nikolaychik M. A., Puzanov D. A., Klimkovich N. M. Modeling of the geomechanical state of the rock massifs being undermined repeatedly. *Vesti Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 32–39. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-32-39>**М. А. Журавков<sup>1</sup>, А. Б. Петровский<sup>2</sup>, В. Я. Прушак<sup>3</sup>, М. А. Николайчик<sup>1</sup>, Д. А. Пузанов<sup>4</sup>, Н. М. Климович<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*ОАО «Беларуськалий», Солигорск, Минская область, Республика Беларусь*<sup>3</sup>*Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством, Солигорск,  
Минская область, Республика Беларусь*<sup>4</sup>*Институт горного дела, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь***МОДЕЛИРОВАНИЕ ГЕОМЕХАНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ  
ПОВТОРНО ПОДРАБАТЫВАЕМЫХ МАССИВОВ ГОРНЫХ ПОРОД**

**Аннотация.** Предложена геомеханическая модель, разработана технология численного моделирования и выполнено компьютерное моделирование геомеханического состояния повторно подрабатываемого массива горных пород Третьего калийного горизонта Старобинского месторождения с учетом его структурных и прочностных осо-

бенностей, а также технологических схем первичной отработки. Установлены закономерности формирования зон напряженно-деформированного состояния в подработанном массиве, вмещающем погашенные очистные выработки и межпанельные целики. Показано, что устойчивость выработок, расположенных в областях повторной подработки, существенным образом зависит от времени, прошедшего со времени первичной подработки, и от места расположения выработки в массиве относительно места проведения первичных горных работ. Установлено, что наиболее опасными для повторного размещения выработок являются зоны обобщенного сдвига, так как в них наиболее вероятно активизация процессов сдвижения и разрушения породных масс. В областях обобщенного сжатия происходят процессы уплотнения обрушенных породных масс. Вследствие этого по истечении значительного периода времени состояние массива горных пород в данных зонах можно рассматривать как приближенное к естественному, без дополнительных структурных нарушений. В таких областях эффективные механические характеристики массивов горных пород практически восстанавливаются. Поэтому наибольшая устойчивость выработок будет достигнута при размещении их в области напряженного состояния обобщенного сжатия в зоне обрушенных, уплотненных пород отработанных очистных ходов и лав.

**Ключевые слова:** геомеханическая модель, напряженно-деформированное состояние, критерии предельного состояния, массив горных пород, выработка

**Для цитирования:** Моделирование геомеханического состояния повторно подрабатываемых массивов горных пород / М. А. Журавков [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 32–39. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-32-39>

**Introduction.** Recently the question of mining the remaining mineral reserves in the areas of the 3<sup>rd</sup> potash layer, mined out more than 40 years ago with the use of different mining systems – pillar and room and pillar systems – has acquired special relevance to maintain the raw material base of the mines of Starobin potash salt deposit. To assess the technological possibility, safety and economic feasibility of additional ore extraction from specific sections of the rock strata, it is necessary to study the condition of mining systems at such sections of the mine field by performing the geomechanical modelling of the stress-strain state of the rock massif, taking into account its structural and strength characteristics, as well as technological schemes of mining. At the same time, as a rule, there is no detailed information on the geological structure of the undermined rock massif at the start of repeated mining. Analysis of previous researches in the field of rock massif geomechanics showed that after mining operations, geomechanical processes, caused by man-made disturbance of the natural deflection of the rock mass stress-strain state, is a multistage temporal process, in the development of which several characteristic stages can be identified, due to structural changes in the rock mass in the area of mining operations and changes of the stress-strain state in the considered area of the massif with the time [1–4]. Besides, the geomechanical state of the workings being designed for mining in the areas of repeated undermining also depends on the time of executing the mining in relation to the time of finishing the primary mining (primary undermining) and the location of the mine workings in the rock massif in relation to the primary mining [5]. However, until now, many basic principles and theoretical ideas about the geomechanical state and characteristics of the undermined massif when workings are re-located therein remain fragmentary and incomplete. Therefore, the implementation of numerical studies of the geomechanical state of specific areas of the undermined salt massif of the 3<sup>rd</sup> potash layer was accompanied by significant difficulties associated with the need to develop adequate approaches to the construction of numerical geomechanical models. The development of such approaches and construction technology of the numerical geomechanical model, which are presented, in particular, in papers [6, 7], is the basis for the numerical experiments on the geomechanical modelling of the undermined salt massif in several sections of the mine field (western panels No. 18, 22 and 24) of mine No. 3 planned for repeated mining. In turn, the results of the numerical studies have been summarized to provide general recommendations for the location of the development workings of the new extraction pillars.

It should be noted that the implementation of research related to the construction of mechanical, mathematical and numerical models and calculation schemes for the study of geomechanical processes in rock massifs with a large-scale system of underground workings is an urgent task not only for the Republic of Belarus, but also for all countries with a developed mining industry, see, for example, [8–11].

The purpose of the research presented in the article was to study, using the developed geomechanical numerical model and computer modeling algorithm, the geomechanical state of the re-worked mountain range of the Third potash horizon of the Starobinskoye field, taking into account its structural and strength features, as well as technological schemes during the primary mining of the rock layer. As a result of the studies carried out, it was necessary to establish the regularities of the formation of stress-

strain zones in the massif in areas containing extinguished treatment workings and inter-panel pillars, and to issue recommendations for the placement of new workings in re-worked rock massifs.

**Basic provisions for carrying out modelling studies.** Effective way to estimate type of the stress-strain state, in which these or those parts of undermined rock massif are situated, is using Nadai–Lode parameter, which is determined by principal stresses components and characterizes bulk stressed state [1, 2]: the value in limits  $[-1; -0.5]$  corresponds to generalized tension state; the value in limits  $[-0.5; 0.5]$  corresponds to generalized shear state; the value in limits  $[0.5; 1]$  corresponds to generalized compression state. At the same time, the type of stress state has a significant influence on geomechanical processes in the rock massif and, accordingly, determines the mechanism of its continuity, strength and failure processes [1, 6]. Thus, in generalized compression regions, failure processes due to large acting compressive stresses are most likely to occur. In the generalized strain regions, the processes of rock discontinuity as a consequence of tensile stresses and deformations prevail. In generalized shear regions, there are large mutual displacements of layers and blocks. It is obvious that such “primary” processes subsequently have an important influence on the structure and state of the newly undermined massif. Let us explain this conclusion in terms of geomechanics of processes. In the areas where generalized compression zones were formed after the primary undermining, the processes of rock compression and rock failure prevailed. Therefore, after the shear processes in the undermined massif have ceased, especially after a considerable period of time, the rock massif in these areas can be regarded as “natural” without additional structural disturbances. In the areas of generalized tensile stress after primary undermining, it is most likely that the continuity of the massif is broken by layering and the formation of fractured areas. As a consequence, even after shear processes in the undermined massif have ceased, such areas do not “heal” completely (of course, this depends on the properties of the rocks where such areas have appeared) and may appear during repeated mining. Finally, in the areas of generalized shear after primary undermining, especially in layered rock massifs, areas of significant mutual displacement appear and a new block structure is formed in the massif. It is obvious that even after a long period of time the adhesion coefficient in these areas of the massif differs considerably from the initial one. Consequently, it is not recommended to re-locate workings in such areas, as activation of shear and fracture processes along previously appeared slip lines is most likely in these areas.

Based on the above mentioned, it is clear that the choice of mine workings location in the repeatedly undermined massif has a considerable influence on the geomechanical state and rock mass stability in the vicinity area of the workings contour.

It should be noted that the performance of modeling studies requires the use of techniques to consider changes in the mechanical characteristics of the undermined rock massifs, which occurred due to disturbances in its continuity of different nature and the time passed after the undermining [7]. Additionally, it is important to select adequate criteria for the ultimate state and strength characteristics of repeatedly undermined rock massifs [6].

**Geomechanical modelling of the undermined massif.** Numerical studies were carried out for several sections of the mine field of the 3<sup>rd</sup> potash level of the mine No. 3 (Figure 1) and consisted of two stages.

The first stage of the research was to study the geomechanical condition of the undermined rock strata in the panels No. 22 and 24, which were mined out using the pillar mining system. The second stage of the study involved studying the geomechanical condition of the undermined rock strata in the section of the panel No. 18, which was mined out by the room and pillar mining system.

The initial conditions for the first stage of the study are as follows. Panel No. 22 was mined out by the longwall face No. 35 with extraction of the 4th sylvinitic layer and leaving the layers 2,2–3,3. Panel No. 24 was mined out by the longwall face No. 7 which mined out the 2<sup>nd</sup> and the 3<sup>rd</sup> sylvinitic layers and left the 4<sup>th</sup> sylvinitic layer. Figure 2 shows a vertical section of the salt massif in the study area. Another object of study is a service entry (see position 3 in the Figure 2), which was driven in the pillar between the longwall faces No. 7 and 35. It was 4.5 m wide and 3.0 m high. The roof of the mentioned entry was secured with rows of KAMB anchors of length  $L = 1.2$  m.

The modelling studies were carried out taking into account the sequence and time of mining the extraction pillars: first the face No. 7 and then the face No. 35. The service entry (see position 3 in the Figure 2) was driven after a considerable period of time after the completion of the mining the mentioned faces.

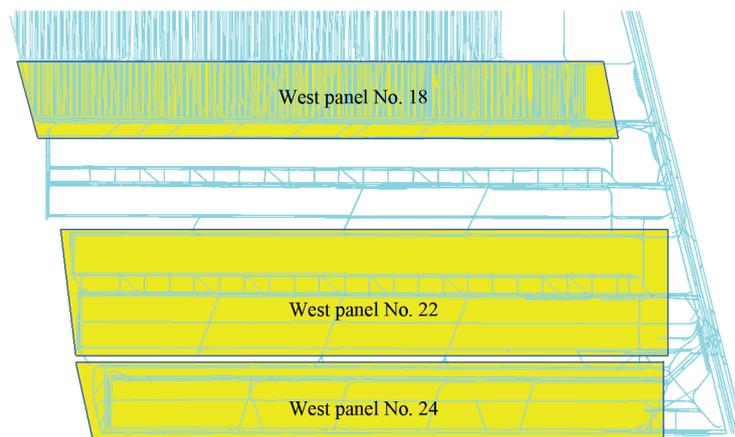


Figure 1. Excerpt from the plan of the 3<sup>rd</sup> potash level of the mine No. 3, with highlighting the studied areas

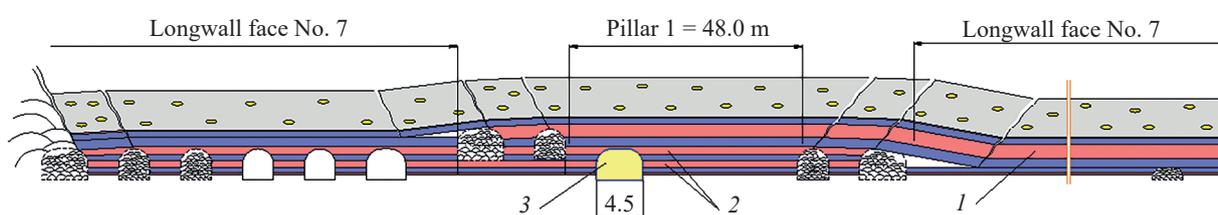


Figure 2. Cross section of the studied area of the rock massif on the section of the panels No. 22 and 24:  
1 – sylvinite layer 4; 2 – sylvinite layers 2 and 3; 3 – service entry

The computer modelling technique took into account changes in the physical and mechanical properties of the rock strata according to the approach described in the paper [7]. At the first stage of the study, the geomechanical state of the rock massif was modelled during the mining out the face No. 7 in the layers 2, 2–3, 3. After mining out this face, physical and mechanical properties of the corresponding section of the rock massif (in the collapse and fracture areas) were changed according to the algorithm proposed in the paper [7]. After that, the geomechanical state of the rock massif was modelled taking into account the mining out the face No. 35 in the layer 4. After this face was mined out, the physical and mechanical properties of the new sections of the rock massif were also changed. After that, according to the described procedure of numerical calculations sequence, modelling aimed at study of geomechanical state of the rock massif undermined by faces the No. 7 and 35 in the vicinity area of the service entry located in the pillar between the faces was executed. In this case, the state of the massif in the vicinity area of the entry contour was studied before and after anchoring of the entry roof.

The geomechanical numerical model was built considering the following generalized layers: the underlying salt layer with a thickness of 400 m, above it a 22 m thick underlying salt layer, followed by a 6 m thick rock salt layer, sylvinite layer 1 (0.33 m), layer 1–2 (0.5 m), sylvinite layer 2 (0.7 m), layer 2–3 (0.6 m), sylvinite layer 3 (0.7 m), layer 3–4 (0.95 m), sylvinite layer 4 (1.2 m), reduced layer including layer 4–5 and sylvinite layer 5 (0.7 m) and the overlying rock salt layer (8.0 m, 22.0 and 679.25 m).

The geometric dimensions of the considered rock massif area were chosen taking into account the absence of influence of the mined out faces on the condition of the distant boundary areas of the massif (650 m from the face positions).

The physical and mechanical properties of rocks and anchor material used as initial data are given in the Table.

The second stage of the research was carried out by modelling the geomechanical state of the newly undermined rock massifs in the vicinity area of the exploratory workings driven in the roadways at the section of the western panel No. 18, which was mined out in 1978–1980 using the room and pillar mining system. The modelling studies were carried out taking into account the mining sequence and the time of the mining operations. This included the fact that the exploratory workings were driven over a considerable period of time (more than 40 years) after the end of the mining operation.

## Physical and mechanical properties of materials

Material	Density, kg/m <sup>3</sup>	Young's modulus, GPa	Poisson's ratio	Shear modulus, GPa	Compressive strength, MPa	Tensile strength, MPa	Tensile strength, MPa	Adhesion coefficient, MPa
Sediment layer	2043	1.0	0.30	0.38	–	–	–	–
Clay and marl strata	2000	5.0	0.30	1.92	–	–	–	–
Rock salt	2300	1.75	0.28	0.68	30.0	1.0	1.209 625	2.738 612
Sylvinite	2300	1.64	0.29	0.64	26.3	1.0	1.220 858	2.828 427
Underlying salt	2300	2.0	0.35	0.74	35.2	2.0	1.102 798	4.195 235
Caved debris	2300	0.175	0.30	0.068	30.0	1.0	1.209 625	2.738 612
Steel	7852	200.0	0.30	76.90	0	460.0	–	–

When performing numerical experiments for the exploratory working, the positioning of the roof working was considered on the roof of the 2nd sylvinite layer without cutting the 1st sylvinite layer. During the computer modelling, as in the first stage of the research, changes in the physical and mechanical properties of the rock strata were taken into account. First, the geomechanical state of the rock massif was modelled during the mining the concerned area by means of pillar or room and pillar mining systems. After mining, the physical and mechanical properties of the corresponding section of the rock massif (in the collapse and fracture areas) were changed according to the algorithm proposed in the paper [7]. Following this, the route of the exploratory workings was modelled in accordance with the described numerical sequence procedure.

The geomechanical numerical model was built considering the following generalized layers: the upper sediment layer of 108.5 m thick, the clay and marl strata of 303.0 m thick and the underlying rock salt layer with a thickness of 518.5 m. The selection of such effective layers is based on the lithological description of exploration well No. 137. In the exploratory workings at issue, we considered interlaying of sylvinite with rock salt.

The geometric dimensions of the considered rock massif area were chosen taking into account the absence of influence of the mined out faces on the condition of the distant boundary areas of the massif (400 m from the faces and workings' positions).

The general scheme of geomechanical computer model construction for solving problems of rock mechanics and massifs is presented in [12]. The content of stages and algorithms of numerical implementation of all stages of geomechanical computer model construction are described, in particular, in the papers [2, 6, 12].

The model problem was solved in two-dimensional formulation. Calculations were performed as an iterative sequence of solving problems in the quasi-static formulation. The behaviour of the layers was considered in the framework of the theory of linearly deformable quasi-homogeneous and quasi-isotropic media [2].

The boundary conditions at the lower boundary of the underlying salt layer correspond to the rigid anchorage condition (the influence of mining does not extend to the given depths). The side boundaries are subject to side pressure of  $\rho gh$  when the initial stress state is calculated. In subsequent iterations, taking into account the presence of mining works, the boundary condition corresponds to the displacement limitation condition along the  $X$ -axis. The model problems were solved by taking into account the gravity forces.

**Summary of the results of the numerical experiments.** Some of the results of the performed series of numerical experiments are shown in the Figures 3 and 4.

The processing of the results enabled us to formulate important conclusions about the geomechanical state of the repeatedly undermined rock massifs and the stability of the mine workings located in such areas of the rock strata. So, in respect to the situation of mining the rock massif by the faces No. 7 and 35 and location of the working in the pillar between these faces (the first block of the research) it was determined that as a result of the primary mining the face No. 7 and then the face No. 35 generalized shear stress state area is formed in the pillar area between the faces (see Figure 3, *a*).

In generalized shear areas after the primary undermining, particularly in bedded rock massifs, areas of significant interlayer displacement appear. Even after a considerable period of time, the adhesion coefficient in these areas of the massif is significantly different from the original coefficient. Consequently,

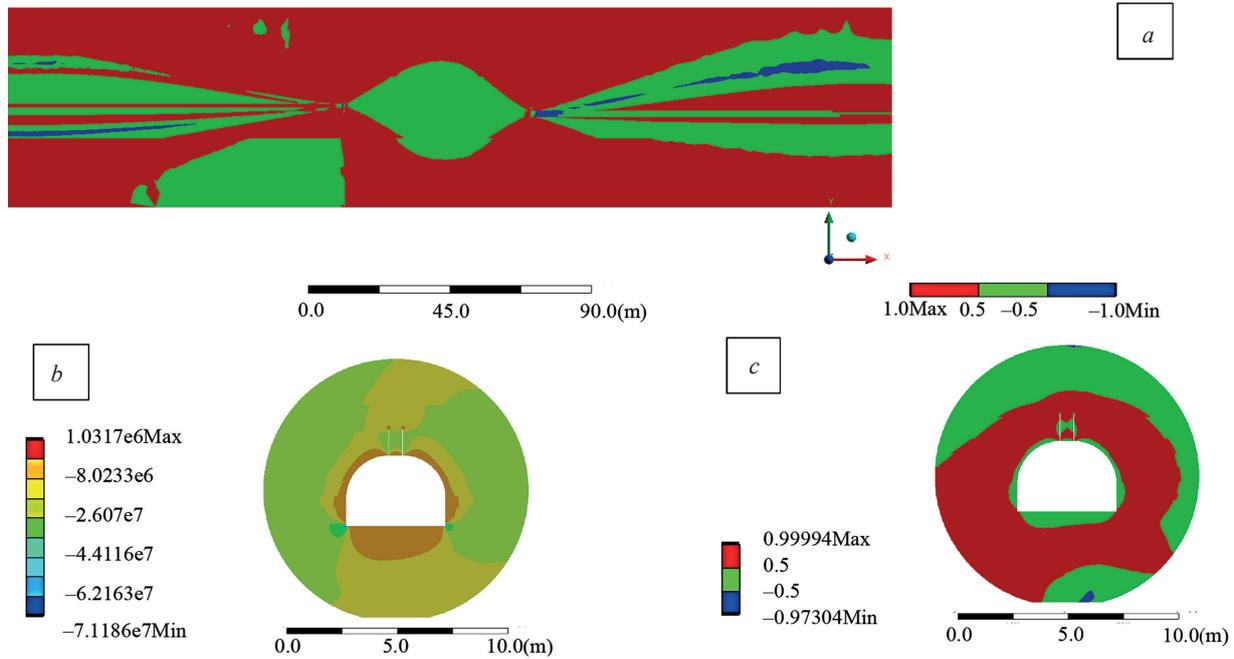


Figure 3. Examples of the formation of stress-strain state zones in the rock massif at the section of the western panels No. 22 and 24: a – distribution of the Nadai–Lode coefficient in the massif in the area between the faces, taking into account the rock collapse after successive driving the faces No. 7 and 35; b – horizontal main stresses in the vicinity area of the service entry; c – distribution of the Nadai–Lode coefficient in the vicinity area of the service entry

it is not advisable to re-locate workings in these areas, as they are most likely to activate shear and failure processes along the slip lines. After driving the service entry, an irregular stress state is formed in the vicinity area of its contour. The main horizontal stresses vary from compressive to tensile stresses (see Figure 3, b). In addition, a generalized shear stress state occurs in the vicinity of the working contour (see Figure 3, c). In this case, the dimensions of the generalized shear zones in the side boundary area and in the working floor extend deep into the massif at distances of tens of centimetres. All these facts together activate the deformation processes along the latent slip surfaces in the vicinity area of the working contour and initiate significant displacements in the side boundary area of the working.

The picture is different if the working is located in the zone of the mined out faces (see Figure 3, a). In this zone, an area of generalized compression is formed after the primary undermining. In such areas the processes of compaction of the caved rock masses take place. Therefore, after a considerable period of time, the state of the rock massifs in these areas can be regarded as “almost natural” without additional structural disturbances. In such areas, the effective mechanical characteristics of the rock massifs are practically restored.

In the case of mining the rock massif in the area of western panel No. 18 (second stage of the research), it was found that, as in the case of room and pillar mining, extensive zones of generalized shear stress are formed in the rock massif as a result of pillar mining (see Figure 4). As in the previous example (the first stage of the research), zones of significant mutual displacement appear in such zones after primary mining. Accordingly, the re-location of workings in such zones is not recommended, as they are most likely to activate the shear and failure processes along the slip lines.

A different picture can be seen in the collapse areas above the mined out face space. In these areas, the caved rocks are compacted over time and the mechanical characteristics of the rock massifs are practically restored. Thus, the location of mine workings in the area of caved compacted rocks is a priority in terms of their stability, which is confirmed by the results of monitoring the deformation pattern of exploratory workings. At the same time, the results of numerical modelling show that there is no ultimate state in terms of reaching critical tensile and compressive stresses along the contour of the workings in question.

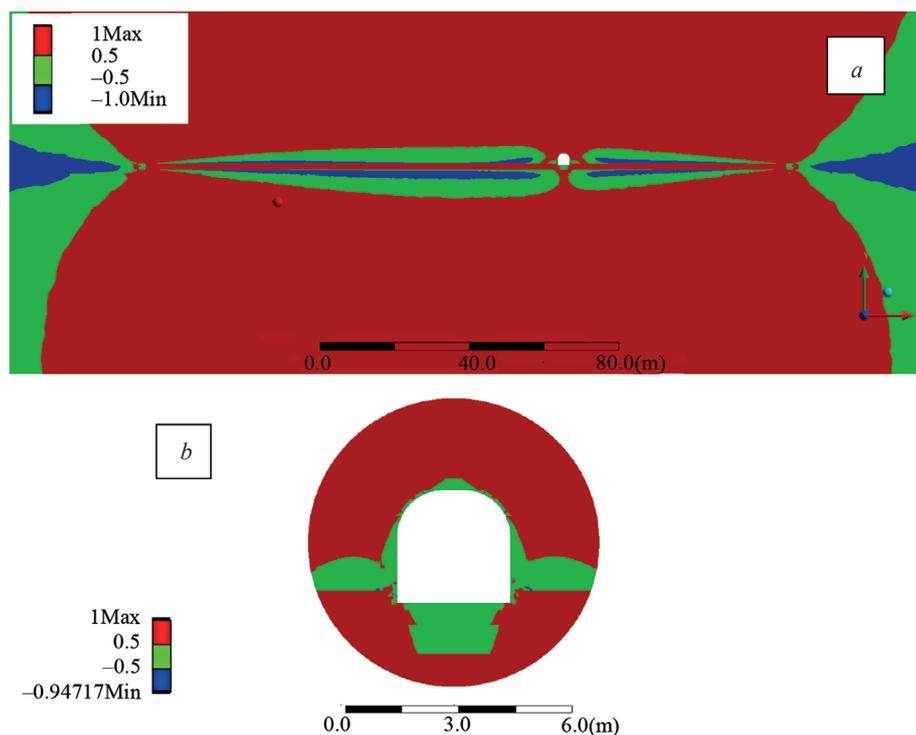


Figure 4. Examples of the formation of stress-strain state zones in the rock massif at the section of the western panel No. 18: *a* – distribution of the Nadai–Lode coefficient in the massif after driving the exploratory working; *b* – distribution of the Nadai–Lode coefficient in the vicinity area of the contour of the exploratory working

**Conclusions.** Carried out geomechanical modelling of the repeatedly undermined rock massifs of the 3<sup>rd</sup> potash level of the Starobin deposit taking into account its structural and strength features, as well as the technological schemes of the primary mining. The processing of the results of the series of numerical experiments enabled us to formulate important statements about the geomechanical state of the repeatedly undermined rock massifs and the stability of the mine workings located in such areas of the rock strata.

It is shown that the geomechanical state of the workings located in the repeatedly undermined areas significantly depends on the time passed since the primary mining and on the location of the workings in the massif relative to the location of the primary mining operations. The most dangerous for repeated mining are the areas of generalized shear, since the processes of rock mass movement and failure are most likely to be active in these areas. It is demonstrated that in this case, in the vicinity of the contour of the mined out area, deformation processes are activated by latent slip surfaces and displacements of considerable values are initiated along the mine workings contour. In the areas of generalized compression, the processes of compaction of caved rock take place. That is why after a considerable period of time, the state of the rock massif in these areas can be treated as approximating to the natural state, without additional structural disturbances. In such areas, the effective mechanical characteristics of the rock massifs are practically restored. Accordingly, locating the workings in the area of collapsed, compacted rock is a priority in terms of their stability. The numerical modelling results show that there is no limit state in terms of reaching the critical tensile and compressive stresses along the contour of the considered workings.

The performed researches enable us to develop methodological recommendations for choosing the most optimal location of mine workings in repeatedly undermined rock massifs, previously mined out by pillar or room and pillar mining systems.

## References

1. Ivlev D. D. Maksimova L. A., Nepershin R. I., Radaev Yu. N., Senashov S. I., Shemyakin E. I. *Limit State of Deformed Bodies and Rocks*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2008. 832 p. (in Russian).

2. Zhuravkov M. A. *Mathematical Modeling of Deformation Processes in Solid Deformable Media (on the Example of Problems of Mechanics of Rocks and Massifs)*. Minsk, Belarusian State University Publ., 2002. 456 p. (in Russian).
3. Rodionov V. N., Sizov I. A., Cvetkov V. M. *Fundamentals of Geomechanics*. Moscow, Nedra Publ., 1986. 301 p. (in Russian).
4. Fisenko G. L. *The Limiting State of Rocks around the Workings*. Moscow, Nedra Publ., 1976. 272 p. (in Russian).
5. Kartashov Yu. M., Matveev B. V., Miheev G. V., Fadeev A. B. *Strength and Deformability of Rocks*. Moscow, Nedra Publ., 1973. 269 p. (in Russian).
6. Chizhik S. A., Zhuravkov M. A., Petrovskiy A. B., Prushak V. Ya., Puzanov D. A. Ultimate state criteria and strength characteristics of the rock massifs being undermined repeatedly. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 4, pp. 420–429. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-4-420-429>
7. Chizhik S. A., Zhuravkov M. A., Petrovskiy A. B., Prushak V. Ya., Puzanov D. A. Calculation of the effective mechanical characteristics of the undermined rock mass. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2022, vol. 66, no. 1, pp. 83–90. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2022-66-1-83-90>
8. Schweiger H. F., Fabris C., Ausweger G., Hauser L. Examples of successful numerical modelling of complex geotechnical problems. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2019, vol. 4, no. 2, 10 p. <https://doi.org/10.1007/s41062-018-0189-5>
9. Čosić S., Avdić M., Sušić A., Ljubojev M. Finite element analysis of deep underground salt caverns. *Mining & Metallurgy Engineering Bor*, 2013, no. 3, pp. 65–72. <https://doi.org/10.5937/MMEB1303065C>
10. *Computational Geomechanics: Book of extended abstracts. 4<sup>th</sup> International Symposium on Computational Geomechanics (ComGeo IV), Assisi, Italy, 2–4 May, 2018*. Rhodes, International Centre for Computational Engineering, 2018. IX, 149 p.
11. Voloshyn O., Riabtsev O. Some important aspects of rock mechanics and geomechanics. *Essays of Mining Science and Practice. E3S Web of Conferences*, 2019, vol. 109, pp. 00114. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900114>
12. Zhuravkov M. A., Konovalov O. L., Bogdan S. I., Prohorov P. A., Krupoderov A. V. *Computer Modeling in Geomechanics*. Minsk, Belarusian State University Publ., 2008. 443 p. (in Russian).

### Information about the authors

*Michael A. Zhuravkov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Department, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>. E-mail: [zhuravkov@bsu.by](mailto:zhuravkov@bsu.by).

*Andrey B. Petrovskiy* – Deputy Chief Engineer, JSC “Belaruskali” (5, Korzh Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: [belaruskali.office@kali.by](mailto:belaruskali.office@kali.by).

*Viktor Ya. Prushak* – Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Technical Director, Soligorsk Institute of Resource Saving Problems with Pilot Production (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: [ipr@sipr.by](mailto:ipr@sipr.by)

*Mikhail A. Nikolaitchik* – Head of the Laboratory, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-3733-1615>. E-mail: [Nikolaitchik.m@gmail.com](mailto:Nikolaitchik.m@gmail.com)

*Dmitry A. Puzanov* – Researcher, Institute of Mining (69, Kozlov Str., 223710, Soligorsk, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: [sgd@list.ru](mailto:sgd@list.ru)

*Nikita M. Klimkovich* – Engineer, Belarusian State University (4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [nikita.klimkovitch@yandex.ru](mailto:nikita.klimkovitch@yandex.ru)

### Информация об авторах

*Журавков Михаил Анатольевич* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-7420-5821>. E-mail: [zhuravkov@bsu.by](mailto:zhuravkov@bsu.by)

*Петровский Андрей Борисович* – заместитель главного инженера, ОАО «Беларуськалий» (ул. Коржа, 5, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: [belaruskali.office@kali.by](mailto:belaruskali.office@kali.by)

*Прушак Виктор Яковлевич* – академик Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, технический директор, Солигорский Институт проблем ресурсосбережения с Опытным производством (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: [ipr@sipr.by](mailto:ipr@sipr.by)

*Николайчик Михаил Александрович* – заведующий лабораторией, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-3733-1615>. E-mail: [Nikolaitchik.m@gmail.com](mailto:Nikolaitchik.m@gmail.com)

*Пузанов Дмитрий Александрович* – научный сотрудник, Институт горного дела (ул. Козлова, 69, 223710, Солигорск, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: [sgd@list.ru](mailto:sgd@list.ru)

*Климкович Никита Михайлович* – инженер, Белорусский государственный университет (пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [nikita.klimkovitch@yandex.ru](mailto:nikita.klimkovitch@yandex.ru)

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

УДК 532.5:66.047  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-40-49>

Поступила в редакцию 18.10.2022  
Received 18.10.2022

**П. В. Акулич<sup>1</sup>, В. А. Седнин<sup>2</sup>, М. И. Позднякова<sup>21</sup>**

<sup>1</sup>*Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,  
Минск, Республика Беларусь*

<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

**ТЕПЛОМАССООБМЕН КАПЕЛЬ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ РАСТВОРОВ  
ПРИ РАСПЫЛИТЕЛЬНОЙ ДЕГИДРАТАЦИИ В УСЛОВИЯХ  
КОНВЕКТИВНО-РАДИАЦИОННОГО ЭНЕРГОПОДВОДА**

**Аннотация.** Приведены результаты моделирования дегидратации капель концентрированной жидкости на примере керамики при конвективно-радиационном энергоподводе в условиях прямооточного и противоточного движения фаз, а также импульсных встречных потоков теплоносителя. Сформулирована модель дегидратации одиночной капли на основе уравнений теплопроводности с источником членом и диффузии влаги с учетом изменения ее размера вследствие испарения. При этом учитывается влияние конвективного потока пара с испаряющейся поверхности капли (поток Стефана), а также вдува испаряющегося пара в поток горячего газа на коэффициент теплоотдачи (поправка Сполдинга). Воздействие инфракрасного излучения описывается уравнением Бугера. Уравнение движения капли в газовом потоке учитывает силы, обусловленные гравитацией, разностью скоростей и плотностей фаз. В результате численного моделирования установлено, что при противоточном движении фаз интенсивность дегидратации выше, чем при прямооточном. Это обусловлено как повышением относительной скорости движения фаз, так и увеличением времени пребывания капли в интенсивной области инфракрасного излучения. Показано, что дальнейшая интенсификация испарения возможна за счет создания импульсных встречных потоков теплоносителя. Выполнено сравнение расчетных результатов с опытными данными, подтверждающее адекватность модели. Результаты исследования могут быть полезны при разработке новых теплотехнологий и аппаратов для дегидратации концентрированных растворов и суспензий.

**Ключевые слова:** тепломассообмен капли, распылительная сушка, радиационно-конвективная сушка

**Для цитирования:** Акулич, П. В. Тепломассообмен капель концентрированных растворов при распылительной дегидратации в условиях конвективно-радиационного энергоподвода / П. В. Акулич, В. А. Седнин, М. И. Позднякова // Вес. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 40–49. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-40-49>

**Piotr V. Akulich<sup>1</sup>, Vladimir A. Sednin<sup>2</sup>, Marina I. Pozdnyakova<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

<sup>2</sup>*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

**HEAT AND MASS TRANSFER OF DROPS OF CONCENTRATED SOLUTIONS DURING SPRAY  
DEHYDRATION UNDER CONDITIONS OF CONVECTIVE-RADIATION ENERGY SUPPLY**

**Abstract.** The results of modeling the dehydration of drops of a concentrated liquid, on the example of ceramics, with convective-radiation energy supply under conditions of direct-flow and counter-current phase motion, as well as pulsed counter-flows of gas, are presented. A model for the dehydration of a single drop is formulated based on the equations of heat conduction with a source term and diffusion of moisture, taking into account the change in its size due to evaporation. This takes

into account the influence of the convective vapor flow from the evaporating droplet surface (Stefan flow), as well as the blowing of evaporating vapor into the hot gas flow on the heat transfer coefficient (Spalding correction). The impact of infrared radiation is described by the Bouguer equation. The equation of motion of a drop in a gas flow takes into account the forces due to gravity, the difference in velocities and phase densities. As a result of numerical simulation, it was found that with countercurrent phase movement, the intensity of dehydration is higher than with cocurrent flow. This is due to both an increase in the relative velocity of the phases and an increase in the residence time of the drop in the intense region of infrared radiation. It is shown that further intensification of evaporation is possible due to the creation of pulsed counter gas flows. The calculated results are compared with the experimental data, which confirms the adequacy of the model. The results of the study can be useful in the development of new heat technologies and devices for dehydration of concentrated solutions and suspensions.

**Keywords:** heat and mass transfer of a drop, spray drying, radiation-convective drying

**For citation:** Akulich, P. V., Sednin V. A., Pozdnyakova M. I. Heat and mass transfer of drops of concentrated solutions during spray dehydration under conditions of convective-radiation energy supply. *Vesti Natsyyanal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 40–49 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-40-49>

**Введение.** Процессы распылительной дегидратации (сушки) жидких материалов с разнообразными свойствами находят широкое распространение в различных отраслях промышленности. Они применяются при разработке перспективных технологий и получении новых материалов (композитных, микрогранулированных, быстрорастворимых, ультрадисперсных). Однако эти технологии характеризуются высокой энергоемкостью, поэтому проблемы повышения эффективности и снижения энергозатрат привлекают внимание многих исследователей.

Различные методы повышения эффективности всесторонне изучаются и совершенствуются. Так, разрабатываются и применяются современные двухстадийные технологии обезвоживания (выпаривания и сушки или распылительной сушки и досушивания материала в кипящем слое); исследуются предварительный подогрев и перегрев термостойких жидкостей; ведутся поиски активизации гидродинамического режима на основе струйных, закрученных и сильно нестационарных потоков теплоносителя, генерируемых камерами пульсационного горения; модернизируются системы диспергирования и ввода ретур (дисперсного материала в факел распыла); большое внимание уделяется технологическим аспектам.

В то же время развиваются исследования конвективно-радиационного подвода энергии. Например, в [1] приводятся результаты исследования конвективно-радиационного способа сушки распылением, в котором поток инфракрасного излучения (ИК-излучения) создается за счет нагрева стенок камеры или расположения нагревателя по оси цилиндрической камеры. В [2] предложено располагать ИК-излучатели на боковой поверхности между жалюзи, через которые подается дополнительный поток теплоносителя. Способ распылительной сушки с комбинированным энергоподводом предложен в патенте № 18467 Республики Беларусь на изобретение «Способ сушки жидких материалов» (автор – П. В. Акулич). Сущность данного способа состоит в конвективно-радиационном энерговоздействии на капли распыляемой жидкости, причем ИК-излучение фокусируется на область факела распыла [3].

Для поиска методов повышения эффективности процессов распылительной дегидратации и их оптимизации применяются различные подходы. Математическое моделирование часто основывается на механике сплошных сред, раздельном описании движения фаз с учетом межфазного теплообмена, на воспроизведении структуры потоков на основе идеализации их смешения. В большей степени изучались кинетика сушки капель при конвективном подводе теплоты, режимы движения фаз в распылительных камерах, свойства полученных материалов [4–7].

Несмотря на накопленный опыт, развиваются исследования формирования требуемой структуры и свойств твердой фазы в зависимости от условий термогидродинамических воздействий, например, при распылительной сублимационной сушке фармацевтических препаратов, суспензий ферритов, синтеза керамических порошков, где используются и анализируются различные способы подвода теплоты. Уделяется внимание изучению влияния комбинированных методов энергоподвода, в том числе конвективно-радиационного, а также сильно нестационарных термогидродинамических воздействий [8–12]. Развитие энергоэффективных технологий распылительной дегидратации концентрированных растворов обусловлено важностью получения разнообразных порошкообразных материалов с требуемыми свойствами и высокой их практической значимостью.

*Цель работы* – исследование методов интенсификации тепломассообмена капель при сушке распылением путем комбинированного энергетического воздействия конвекцией и ИК-излучением, а также импульсных режимов встречных потоков движения фаз и теплоносителя.

**Математическая модель.** Рассмотрим тепломассообмен капли концентрированного раствора или суспензии применительно к условиям распылительной дегидратации. Поскольку концентрация частиц в потоке распылительной камеры мала, можно пренебречь соударением и взаимодействием частиц, а также дроблением и их коагуляцией и ограничиться рассмотрением одиночной частицы. Испаряемая капля раствора (суспензии), на которую действуют силы тяжести, аэродинамического сопротивления потока теплоносителя, выталкивающая сила Архимеда, движется сверху вниз. Теплота к частице подводится конвекцией и ИК-излучением, которое направлено вертикально вниз. Будем учитывать диффузию влаги, теплопроводность вещества частицы и изменение размера капли, влияние конвективного потока пара с испаряющейся поверхности капли (поток Стефана), а также вдува испаряющегося пара в поток горячего газа на коэффициент теплоотдачи (поправка Сполдинга). Рассмотрим влияние различных режимов воздействия на частицу, в частности прямого и противоточного движения фаз, импульсных встречных потоков теплоносителя, в том числе в сочетании с инфракрасным облучением.

Моделирование данного процесса позволяет исследовать влияние отдельных параметров на кинетику и динамику тепломассообмена капель концентрированных растворов и оценить пути интенсификации и возможности использования в реальных аппаратах с комбинированным энергоподводом.

Уравнение переноса влаги внутри капли (частицы) имеет вид

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \nabla \cdot (-D_{\text{эф}} \nabla C) = J - \mathbf{u} \nabla C, \quad (1)$$

где  $C$  – концентрация влаги в капле (частице), кг/м<sup>3</sup>;  $D_{\text{эф}}$  – эффективный коэффициент диффузии влаги, м<sup>2</sup>/с;  $\tau$  – время, с.

Уравнение переноса теплоты запишем следующим образом:

$$\rho_{\text{ч}} c_{\text{ч}} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \nabla \cdot (-\lambda_{\text{эф}} \nabla T) = I - \rho_{\text{ч}} c_{\text{ч}} \mathbf{u} \nabla T, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{ч}}$ ,  $c_{\text{ч}}$  – соответственно плотность, кг/м<sup>3</sup>, и удельная теплоемкость капли (частицы), Дж/(кг·К);  $T$  – температура вещества капли, К;  $\lambda_{\text{эф}}$  – эффективная теплопроводность вещества капли, Вт/(м·К).

На поверхности частицы задача решается при граничных условиях III рода:

$$-\mathbf{n} \cdot (-D_{\text{эф}} \nabla C) = \beta (\rho_{\text{п.п}} - \rho_{\text{п.г}}) K_S, \quad (3)$$

$$-\mathbf{n} \cdot (-\lambda_{\text{эф}} \nabla T) = \alpha (T_{\text{пов}} - T_{\text{г}}) - r_{\text{п}} \beta (\rho_{\text{п.п}} - \rho_{\text{п.г}}) K_S, \quad (4)$$

где  $\rho_{\text{п.п}}$ ,  $\rho_{\text{п.г}}$  – концентрация (плотность) паров на поверхности частицы в состоянии насыщения и в потоке газа соответственно,  $\rho_{\text{п.п}} = \chi C_{\text{пов}}$ , кг/м<sup>3</sup>;  $T_{\text{г}}$  – температура газа, К;  $r_{\text{п}}$  – удельная теплота парообразования, Дж/кг;  $\chi$  – равновесное соотношение плотностей пара и жидкости на поверхности частицы;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $\beta$  – коэффициент массоотдачи, м/с.

Множитель  $K_S = 1/(1 - \rho_{\text{п.п}}/\rho_{\text{г}})$  учитывает конвективный поток пара с испаряющейся поверхности капли (поток Стефана).

Коэффициент теплоотдачи определяется по корреляционной зависимости  $Nu = [(\ln(1 + B))/B] \times (2 + 0,55Re^{0,5}Pr^{0,33})$ , где  $B$  – теплообменное число Сполдинга,  $B = c_{\text{рп}}(T_{\text{г}} - T_{\text{пов}})/r_{\text{п}}$ . Значения физических параметров находятся по средней температуре в пограничном слое, приближенно равной  $(T_{\text{г}} + T_{\text{пов}})/2$ . Таким образом, учитывалось и анализировалось влияние вдува относительно холодного испаряющегося пара в поток газа на коэффициент теплоотдачи (поправка Сполдинга). Коэффициент массоотдачи рассчитывается по корреляции Фреслинга  $Sh = 2 + 0,55Re^{0,5}Sc^{0,33}$ .

Для скорости изменения диаметра капли запишем уравнение

$$\frac{d(d)}{d\tau} = -\frac{2D_{\text{п}}}{\rho_{\text{ж}} d} Sh (\rho_{\text{п.п}} - \rho_{\text{п.г}}) K_S. \quad (5)$$

Уравнение движения капли в газовом потоке с учетом действующих сил, обусловленных гравитацией, разностью скоростей и плотностей фаз представим следующим образом:

$$\frac{dw}{d\tau} = \frac{2(\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{г}})}{2\rho_{\text{ч}} + \rho_{\text{г}}}g + \frac{3}{2} \frac{\xi}{d} \frac{\rho_{\text{г}}}{2\rho_{\text{ч}} + \rho_{\text{г}}} |v - w|(v - w). \quad (6)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления частиц рассчитаем по формуле Брауэра

$$\xi = \frac{24}{\text{Re}} + \frac{4}{\sqrt{\text{Re}}} + 0,4; \text{Re} = \frac{d|v - w|}{\nu}. \quad (7)$$

Распространение ИК-излучения в поглощающей двухфазной среде описывается на основе закона Бугера. Плотность теплового потока, подведенная к частице за счет ИК-излучения, приближенно определяется по выражению

$$q(z) = q_0 \exp(-kz), \quad (8)$$

где  $q_0 = \varepsilon C'_0 (T_{\text{н}}/100)^4$ ;  $C'_0$  – коэффициент излучения абсолютно черного тела,  $C'_0 = 5,67 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ ;  $\varepsilon$  – степень черноты,  $\varepsilon = 0,9$ .

Для расчета коэффициента ослабления излучения использовалось выражение  $k = 0,25Fc$  [13], где  $F$  – удельная свободная поверхность частиц,  $\text{м}^2/\text{кг}$ ;  $c$  – массовая концентрация капель в объеме,  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Следует отметить, что в этом случае рассматривается поглощательная способность среды, состоящей из абсолютно черных монодисперсных сферических частиц, в зависимости от удельной поверхности частиц, их концентрации и толщины поглощающего слоя. Допускается выполнение законов геометрической оптики. Поэтому в действительности эмпирический коэффициент в показателе экспоненты зависит от множества факторов и не всегда принимает значение 0,25.

Удельный тепловой поток, выделяемый в капле при проникновении ИК-излучения, определяется согласно выражению

$$I = (1 - a_{\text{отр}}) q(z) k_{\text{ч}} \exp[-k_{\text{ч}}(x - R)]. \quad (9)$$

Давление насыщенного водяного пара  $p_{\text{н}}$  в диапазоне температур от 0 до 100 °С рассчитывается по приближенной формуле Антуана

$$p_{\text{н}} = 133,3 \cdot 10^{8,074 - \frac{1733}{T - 39,31}}. \quad (10)$$

Коэффициент диффузии водяных паров в воздухе составляет  $D_{\text{п}} = D_0(p_0/p)(T/T_0)^{1,8}$ , где  $D_0 = 22 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $p_0 = 101325 \text{ Па}$ ,  $T_0 = 273 \text{ К}$ .

Плотность газовой смеси и водяных паров определяется согласно уравнению состояния идеального газа  $\rho_{\text{г}} = p_{\text{г}} M_{\text{г}} / (R^* T)$  и  $\rho_{\text{п}} = p_{\text{п}} M_{\text{п}} / (R^* T)$ .

Скорость движения вещества в частице по координате  $x$  вычислим по формуле

$$u_x = \frac{dR}{d\tau} \frac{x}{R_0} = u_{\text{г}} \frac{x}{R_0}, \quad u_{\text{г}} < 0. \quad (11)$$

Перемещение вещества в частице по оси  $x$  можно представить, как  $dx = -bx$ , где  $b = (R_0 - R)/R_0$ . Аналогично рассчитывается перемещение и по другим осям.

Текущая средняя плотность частицы определяется соотношением

$$\bar{\rho}_{\text{ч}} = \bar{C} + \frac{C_0 d_0^3}{U_0 d^3}, \quad (12)$$

где  $U_0$  – начальное влагосодержание капли,  $U_0 = W_0 / (1 - W_0)$ ,  $\text{кг}/\text{кг}$ . Средняя влажность капли равна  $W = \bar{C} / \bar{\rho}_{\text{ч}}$ .

**Результаты моделирования и сравнение с опытными данными.** Основные параметры, при которых выполнялись расчеты: исходный материал – керамическая суспензия;  $d_0 = 350 \text{ мкм}$ ;  $W_0 = 0,6 \text{ кг}/\text{кг}$ ;  $\rho_{\text{р}} = \bar{\rho}_{\text{ч}0} = 1400 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{ж}} = 1000 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;  $p_{\text{н.г}} = 2 \text{ кПа}$ ;  $T_{\text{с}} = 393 \text{ К}$ ;  $R^* = 8,3142 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ ;

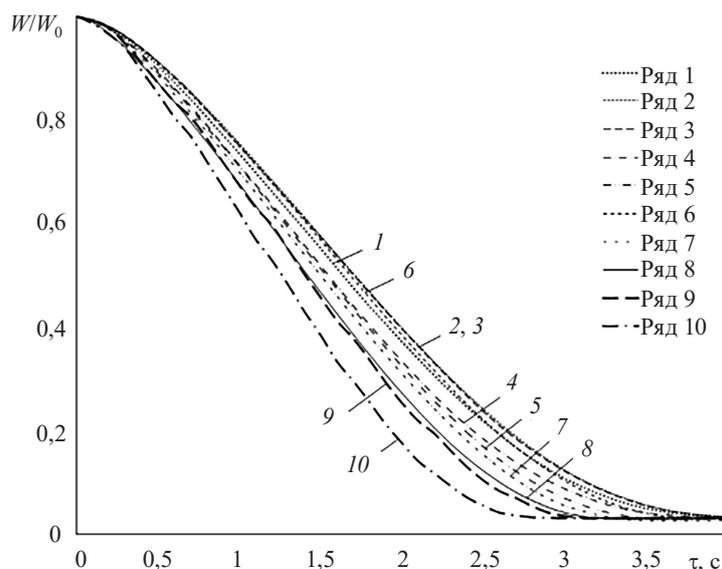


Рис. 1. Кинетические зависимости дегидратации капли концентрированной жидкости: 1 –  $v = 2$  м/с,  $T_{\text{н}} = 1073$  К; 2 –  $v = 2$  м/с,  $q_0 = 0$ ; 3, 6 –  $v = 0,5$  м/с,  $q_0 = 0$ ; 4, 5 –  $v = 0,5$  м/с,  $T_{\text{н}} = 1073$  К (кривые 1–4 при  $D_{\text{эф}} = 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с); 7 –  $v = 0$ ; 8 –  $v = -1$  м/с; 9 –  $v_1 = 2$  м/с,  $v_2 = -3,5$  м/с; 10 –  $v_1 = 5$  м/с,  $v_2 = -6$  м/с (кривые 5–10 при  $D_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с, кривые 7–10 при  $T_{\text{н}} = 1073$  К) (номера кривых соответствуют номерам рядов)

Fig. 1. Kinetic dependences of dehydration of a concentrated liquid drop: 1 –  $v = 2$  m/s,  $T_e = 1073$  K; 2 –  $v = 2$  m/s,  $q_0 = 0$ ; 3, 6 –  $v = 0.5$  m/s,  $q_0 = 0$ ; 4, 5 –  $v = 0.5$  m/s,  $T_e = 1073$  K (curves 1–4 at  $D_{\text{ef}} = 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s); 7 –  $v = 0$ ; 8 –  $v = -1$  m/s; 9 –  $v_1 = 2$  m/s,  $v_2 = -3.5$  m/s; 10 –  $v_1 = 5$  m/s,  $v_2 = -6$  m/s (curves 5–10 at  $D_{\text{ef}} = 5 \cdot 10^{-7}$  m<sup>2</sup>/s, curves 7–10 at  $T_e = 1073$  K) (curve numbers correspond to series numbers)

$M_{\text{п}} = 18,02$  кг/кмоль;  $k = 0,43$ ;  $k_{\text{ч}} = 3000$ ;  $r_{\text{п}} = 2250$  кДж/кг;  $c_{\text{ч}} = 3000$  Дж/(кг·К);  $\mu_{\text{г}} = 21 \cdot 10^{-6}$  Па·с;  $\lambda_{\text{эф}} = 2$  Вт/(м·К);  $a_{\text{отр}} = 0,1$ . Скорость потоков газа в импульсном режиме задавалась выражением  $v = (1 - \delta)v_1 + \delta v_2$ , где  $\delta(\tau)$  – единичная ступенчатая функция времени.

В результате численного решения приведенной системы уравнений получены кинетические зависимости дегидратации капель при различных термогидродинамических режимах (рис. 1).

Вначале было выполнено исследование прямого движения газа и частицы. В этом случае скорости газа и частицы направлены вниз (кривые 1–6). При этом лучистый поток направлен спутно движению фаз. При плотности лучистого потока, соответствующей  $T_{\text{н}} = 1073$  К, интенсивность дегидратации заметно выше при меньшей скорости газа  $v = 0,5$  м/с (кривая 4), чем при  $v = 2$  м/с (кривая 1). Это обусловлено следующим: при большей скорости газа частица быстрее смещается вниз – в область менее интенсивного лучистого потока. Только конвективный подвод теплоты приводит к меньшей интенсивности испарения капли (кривые 2 и 3). Причем интенсивность процесса несколько выше при меньшей скорости газа  $v = 0,5$  м/с (кривая 3) по сравнению с  $v = 2$  м/с (кривая 2), однако это отличие очень незначительно. Конечно, интенсивность массоотдачи зависит от сопротивления диффузии влаги. С ростом эффективного коэффициента диффузии влаги внутри частицы скорость дегидратации возрастает, причем наиболее значительно – при воздействии лучистого потока (кривые 5 и 6). Следует заметить, что при отсутствии скорости потока газа интенсивность выше, чем при наличии скорости спутного потока. Это вызвано тем, что движение частицы замедляется при отсутствии скорости потока газа, при этом время пребывания в зоне большей интенсивности лучистого потока увеличивается.

Из вышеизложенного следует, что для ускорения тепло- и массообменных процессов необходимо увеличивать время пребывания частиц в области высокой плотности излучения. Такого эффекта можно достигнуть за счет встречного движения потока газа. Как показали расчеты, при скорости газа  $v = -1$  м/с, то есть при противоточном движении фаз, интенсивность дегидратации выше (кривая 8), чем при прямооточном движении. При противотоке выше и относительная скорость движения, что приводит к росту конвективной составляющей подвода теплоты. Однако дальнейшее увеличение скорости встречного потока газа вызывает обратное движение частицы вверх, что недопустимо.

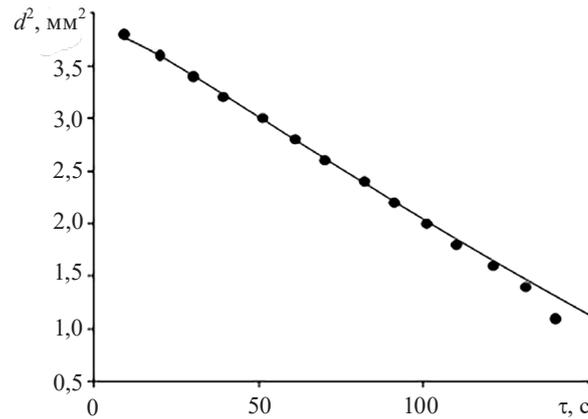


Рис. 2. Изменение квадрата диаметра капли воды от времени при  $v = 0,5$  м/с и  $t = 100$  °С  
 Fig. 2. Change in the square of the diameter of a drop of water from time at  $v = 0.5$  m/s and  $t = 100$  °C

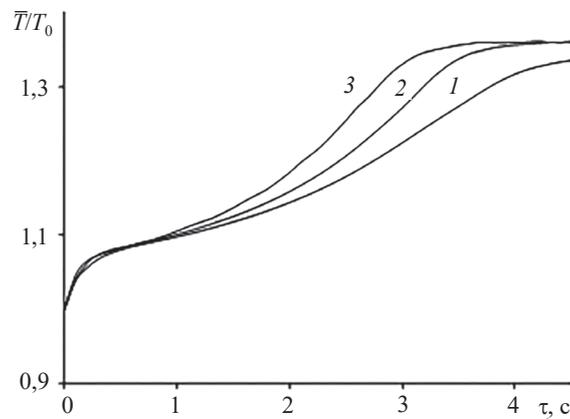


Рис. 3. Температурные зависимости капли (частицы) в процессе дегидратации:  
 $1 - v = 2$  м/с,  $D_{эф} = 10^{-8}$  м²/с;  $2 - v = -1$  м/с,  $D_{эф} = 5 \cdot 10^{-7}$  м²/с;  $3 - v_1 = 5$  м/с,  $v_2 = -6$  м/с,  $D_{эф} = 5 \cdot 10^{-7}$  м²/с  
 Fig. 3. Temperature dependences of a drop (particle) in the process of dehydration:  
 $1 - v = 2$  m/s,  $D_{ef} = 10^{-8}$  m²/s;  $2 - v = -1$  m/s,  $D_{ef} = 5 \cdot 10^{-7}$  m²/s;  $3 - v_1 = 5$  m/s,  $v_2 = -6$  m/s,  $D_{ef} = 5 \cdot 10^{-7}$  m²/s

Повышение относительной скорости движения фаз и времени пребывания частиц в области интенсивного излучения, вблизи излучателей, возможно за счет создания встречных пульсирующих потоков газа с большой амплитудой колебаний скорости, а также встречных потоков газа в сочетании с нижним импульсным потоком. Так, создание импульсного режима встречных потоков теплоносителя с амплитудой скорости верхнего потока  $v_1 = 2$  м/с, а нижнего  $-v_2 = -3,5$  м/с и частотой 2,0 Гц для частицы с приведенными параметрами позволяет ускорить процесс дегидратации по сравнению с рассмотренными выше режимами (кривая 9). Колебания (циклы) скорости верхнего и нижнего потоков осуществляются в противофазе. При включении верхнего потока нижний отключается и наоборот. Увеличение амплитуды колебаний потоков приводит к дальнейшему росту скорости дегидратации (кривая 10).

Сравнение экспериментальных данных, полученных Д. И. Полищуком, с расчетными результатами по кинетике испарения капли воды представлено на рис. 2. Видно, что при исследованных параметрах, скорости воздуха  $v = 0,5$  м/с и температуре 100 °С квадрат диаметра капли изменяется от времени по линейной зависимости, при этом наблюдается хорошее соответствие расчетных и опытных данных.

На температурных кривых, показанных на рис. 3, отчетливо выделяется период прогрева капли (частицы) для исследуемых режимов. Следует отметить, что вначале температура капли повышается от начальной температуры ( $t_n$ ) до температуры мокрого термометра ( $t_{м.т.}$ ). Далее температура капли медленно возрастает, незначительно отличаясь от температуры мокрого термометра, что наиболее характерно для менее интенсивного режима. Затем скорость нагрева возрастает, и температура капли стремится к некоторому равновесному значению.

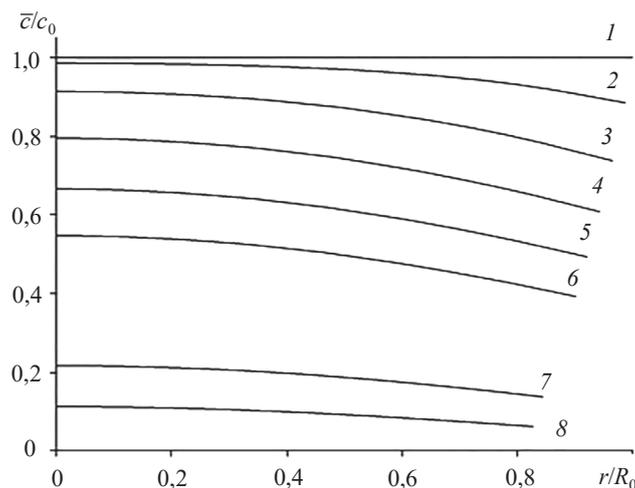


Рис. 4. Эволюция профиля концентрации влаги в частице:  $v = 2$  м/с,  $T_{\text{н}} = 1073$  К,  $D_{\text{эф}} = 10^{-8}$  м<sup>2</sup>/с:  
 $1 - \tau = 0$  с;  $2 - 0,3$  с;  $3 - 0,6$  с;  $4 - 0,9$  с;  $5 - 1,2$  с;  $6 - 1,5$  с;  $7 - 2,0$  с;  $8 - 2,5$  с

Fig. 4. Evolution of the moisture concentration profile in a particle:  $v = 2$  m/s,  $T_{\text{e}} = 1073$  K,  $D_{\text{ef}} = 10^{-8}$  m<sup>2</sup>/s:  
 $1 - \tau = 0$  s;  $2 - 0.3$  s;  $3 - 0.6$  s;  $4 - 0.9$  s;  $5 - 1.2$  s;  $6 - 1.5$  s;  $7 - 2.0$  s;  $8 - 2.5$  s

В ходе исследования было рассчитано поле концентрации влаги в частице и его эволюция во времени. Типичные зависимости концентрации по радиусу частицы приведены на рис. 4. Видно, что в начальный момент времени имеет место равномерное распределение влаги (кривая 1), а затем концентрация влаги в приповерхностном слое становится значительно ниже, чем в центре (например, кривые 2–5). Это свидетельствует об образовании на поверхности капли сухого слоя, то есть «корочки». При этом чем ниже коэффициент диффузии влаги и жестче режим, тем больше разность между концентрацией в центре частицы и на ее поверхности. При значении эффективного коэффициента диффузии влаги  $D_{\text{эф}} = 5 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup>/с эта разница незначительна. Образование «корочки» на поверхности концентрированных капель при их сушке наблюдалось и исследовалось в [14, 15].

На рис. 5 показано, что при стационарных режимах (кривые 1 и 2) в начале процесса наблюдается возрастание интенсивности испарения влаги, которая достигает максимального значения, а затем происходит ее убывание. При этом максимум скорости испарения приходится на период удаления свободной влаги. Противоточный режим движения фаз приводит к большей интенсивности испарения. При импульсной скорости газа также имеет место максимум интенсивности испарения, значение которого значительно выше, чем при стационарных режимах. При этом зависимость интенсивности имеет колебательный характер с локальными экстремумами.

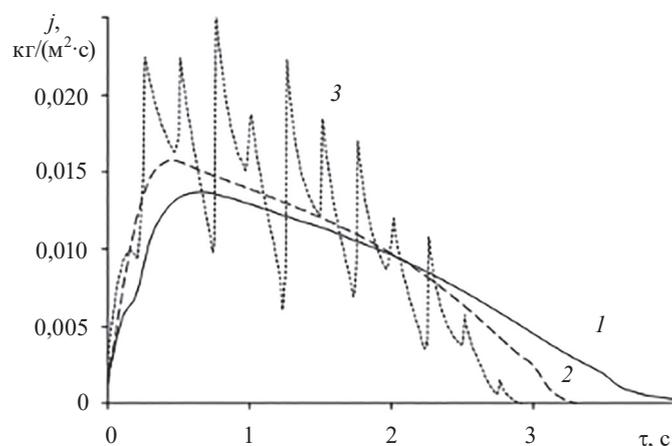


Рис. 5. Зависимости интенсивности испарения влаги от времени (обозначения кривых соответствуют параметрам на рис. 3)

Fig. 5. Dependences of the intensity of moisture evaporation on time (the designations of the curves correspond to the parameters in Fig. 3)

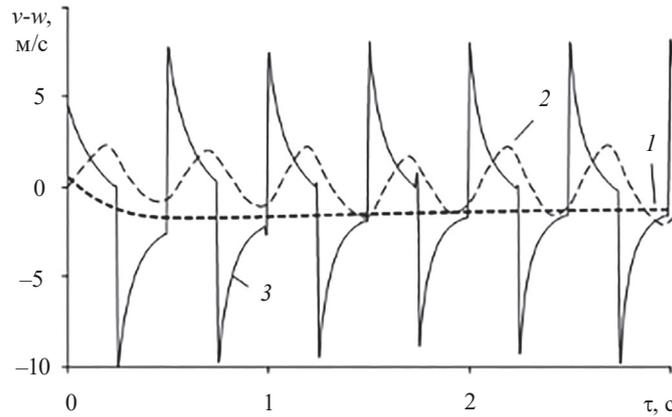


Рис. 6. Зависимости относительной скорости фаз от времени при  $D_{эф} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $T_{и} = 1073 \text{ К}$ :  
 $1 - v = 0,5 \text{ м/с}$ ;  $2 - v_1 = 2 \text{ м/с}$ ,  $v_2 = -3,5 \text{ м/с}$ ;  $3 - v_1 = 5 \text{ м/с}$ ,  $v_2 = -6 \text{ м/с}$   
 Fig. 6. Dependences of the relative velocity of the phases on time at  $D_{эф} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $T_e = 1073 \text{ К}$ :  
 $1 - v = 0.5 \text{ м/с}$ ;  $2 - v_1 = 2 \text{ м/с}$ ,  $v_2 = -3.5 \text{ м/с}$ ;  $3 - v_1 = 5 \text{ м/с}$ ,  $v_2 = -6 \text{ м/с}$

Было установлено, что для режима прямого движения фаз абсолютная величина относительной скорости вначале возрастает на разгонном участке, а затем мало изменяется (рис. 6, кривая 1). При небольшой амплитуде импульсных колебаний газа (рис. 6, кривая 2) максимумы относительной скорости фаз близки к стационарному режиму, то есть относительная скорость невысока. Однако этот режим приводит к значительному замедлению скорости падения частицы и возрастанию времени пребывания в интенсивной области инфракрасного излучения. Это приводит к росту скорости нагрева частицы и испарения влаги. Режим с большей скоростью колебаний газа увеличивает как относительную скорость, так и время пребывания частицы в области интенсивного ИК-излучения (рис. 6, кривая 3). О повышении времени пребывания свидетельствуют зависимости координаты частицы от времени (здесь не представлены).

Следует отметить, что зависимости площади поверхности капли от времени имеют вид подобный кинетическим кривым (рис. 7). В начале процесса наблюдается возрастание скорости изменения поверхности капли, затем зависимости близки к линейным, а далее скорость падает. Уменьшение скорости изменения поверхности обусловлено снижением концентрации влаги и ее градиента, а также возрастанием внутридиффузионного сопротивления при учете его зависимости от концентрации. Из приведенных на рис. 7 зависимостей видно, что наибольшая скорость изменения поверхности капли имеет место при импульсном режиме скорости встречных потоков газа и воздействии ИК-излучения (кривая 3). Следует отметить, что интенсификация

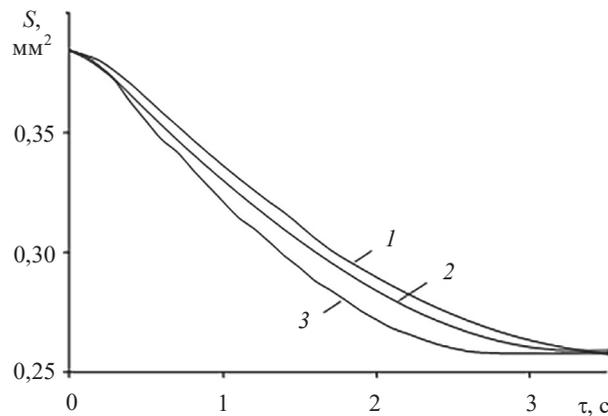


Рис. 7. Зависимости площади поверхности капли (частицы) от времени (обозначения кривых соответствуют параметрам на рис. 3)  
 Fig. 7. Dependences of the surface area of a drop (particle) on time (the designations of the curves correspond to the parameters in Fig. 3)

процесса дегидратации за счет ИК-излучения при исследованных режимах конвективного подвода теплоты ощутима при плотности падающего на частицу лучистого потока около 20–30 кВт/м<sup>2</sup> и выше. Поэтому для эффективного применения ИК-излучения в данном случае целесообразно создание лучистых потоков с большой интенсивностью.

**Заключение.** На основе моделирования дегидратации одиночной капли концентрированной жидкости исследовано влияние радиационно-конвективного энергоподвода в условиях прямо-точного и противоточного движения фаз, а также импульсных встречных потоков теплоносителя. В результате численного моделирования установлено, что при противоточном движении фаз интенсивность дегидратации выше, чем при прямотоке. Это обусловлено как повышением относительной скорости движения фаз, так и увеличением времени пребывания капли в интенсивной области ИК-излучения. Показано, что дальнейшая интенсификация испарения возможна за счет создания импульсных встречных потоков теплоносителя. Выполнено сравнение расчетных результатов с опытными данными, подтверждающее адекватность модели.

Результаты исследования могут быть полезны при разработке новых теплотехнологий и аппаратов для дегидратации концентрированных растворов и суспензий.

### Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (грант № T22-008).

### Acknowledgments

This work was carried out with the financial support of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (grant no. T22-008).

### Список использованных источников

1. Wisniewski, R. Spray Drying Technology Review [Electronic resource] / R. Wisniewski // 45<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, 12–16 July 2015, Bellevue, Washington. – Mode of access: <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/64598>.
2. Феклунова, Ю. С. Разработка и научное обоснование способа распылительной сушки пюре из тыквы при конвективно-радиационном энергоподводе: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ю. С. Феклунова; ФГБОУ ВПО «Астраханский государственный технический университет». – Астрахань, 2015. – 20 с.
3. Акулич, П. В. Методы повышения эффективности процессов распылительной сушки / П. В. Акулич, В. А. Бородуля, Д. С. Слижук // Энергоэффективность. – 2018. – № 4. – С. 28–32.
4. Handbook of Industrial Drying / ed. by A. S. Mujumdar. – 4<sup>th</sup> ed. – CRC Press, 2014. – 1348 p. <https://doi.org/10.1201/b17208>
5. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
6. Акулич, П. В. Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета / П. В. Акулич, А. В. Акулич. – Минск: Выш. шк., 2019. – 376 с.
7. Рудобашта, С. П. Современное состояние и направления развития теории и практики сушки / С. П. Рудобашта // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы), СЭТТ – 2020: сб. науч. тр. 7-й междунар. науч.-практ. конф., Москва, 13–15 окт. 2020 г. – М.: ООО «Мегаполис», 2020. – С. 13–22.
8. Pulse Combustion Spray Drying of Egg White / Zhonghua Wu [et al.] // Food and Bioprocess Technology. – 2015. – Vol. 8, № 1. – P. 148–157. <http://doi.org/10.1007/s11947-014-1384-9>
9. Экспериментальное и численное исследования нестационарного испарения капель жидкости / В. И. Терехов [и др.] // Инженер.-физ. журн. – 2010. – Т. 83, № 5. – С. 829–836.
10. Varghese, S. Evaporation of Water Droplets by Radiation: Effect of Absorbing Inclusions / S. Varghese, S. Gangamma // Aerosol Air Qual. Res. – 2007. – Vol. 7, iss. 1. – P. 95–105. <https://doi.org/10.4209/AAQR.2006.11.0028>
11. Mezhericher, M. The Influence of Thermal Radiation on Drying of Single Droplet/Wet Particle / M. Mezhericher, A. Levy, I. Borde // Drying Technology. – 2008. – Vol. 26, iss. 1. – P. 78–89. <http://doi.org/10.1080/07373930701781686>
12. Акулич, П. В. Термогидродинамические процессы при распылительной сушке в условиях конвективно-радиационного энергоподвода / П. В. Акулич, Д. С. Слижук // Теор. основы хим. технологии. – 2021. – Т. 55, № 1. – С. 34–45. <https://doi.org/10.31857/S0040357121010024>
13. Блох, А. Г. Основы теплообмена излучением / А. Г. Блох. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 332 с.
14. Тутова, Э. Г. Сушка продуктов микробиологического производства / Э. Г. Тутова, П. С. Куц. – М.: Агропромиздат, 1987. – 303 с.
15. Долинский, А. А. Распылительная сушка: в 2 т. / А. А. Долинский, К. Д. Малецкая. – Киев: Академперіодика, 2011. – Т. 1: Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. – 376 с.

## References

1. Wisniewski R. Spray Drying Technology Review. *45<sup>th</sup> International Conference on Environmental Systems, 12–16 July 2015, Bellevue, Washington*. Available at: <https://ttu-ir.tdl.org/handle/2346/64598>
2. Feklunova Yu. S. *Development and Scientific Substantiation of the Method of Spray Drying of Pumpkin Puree with Convective-Radiation Energy Supply*. Astrakhan, 2015. 20 p. (in Russian).
3. Akulich P. V., Borodulya V. A., Slizhuk D. S. Methods for improving the efficiency of spray drying processes. *Energoeffektivnost' [Energy Efficiency]*, 2018, no. 4, pp. 28–32 (in Russian).
4. Mujumdar A. S. (ed.). *Handbook of Industrial Drying*. 4<sup>th</sup> ed. CRC Press, 2014. 1348 p. <https://doi.org/10.1201/b17208>
5. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
6. Akulich P. V., Akulich A. V. *Convective Drying Installations: Methods and Examples of Calculation*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2019. 376 p. (in Russian).
7. Rudobashta S. P. Current state and directions of development of the theory and practice of drying. *Sovremennye energosberegayushchie teplovye tekhnologii (sushka i teplovye protsessy), SETT – 2020: sbornik nauchnykh trudov 7-i mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Moskva, 13–15 oktyabrya 2020 g.* [Modern Energy-Saving Thermal Technologies (Drying and Thermal Processes), SETT – 2020: Collection of Scientific Papers of the 7<sup>th</sup> International Scientific and Practical Conference, Moscow, October 13–15, 2020]. Moscow, Megapolis Publ., 2020, pp. 13–22 (in Russian).
8. Zhonghua Wu, Lian Yue, Zhanyong Li, Jun Li, Mujumdar A. S., Rehkopf J. A. Pulse Combustion Spray Drying of Egg White. *Food Bioprocess Technology*, 2015, vol. 8, no. 1, pp. 148–157. <http://doi.org/10.1007/s11947-014-1384-9>
9. Terekhov V. I., Terekhov V. V., Shimkin N. E., Bi K. Ch. Heat and mass transfer in disperse and porous media experimental and numerical investigations of nonstationary evaporation of liquid droplets. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 5, pp. 883–890. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0410-7>
10. Varghese S., Gangamma S. Evaporation of Water Droplets by Radiation: Effect of Absorbing Inclusions. *Aerosol and Air Quality Research*, 2007, vol. 7, iss. 1, pp. 95–105. <https://doi.org/10.4209/AAQR.2006.11.0028>
11. Mezhericher M., Levy A., Borde I. The Influence of Thermal Radiation on Drying of Single Droplet/Wet Particle. *Drying Technology*, 2008, vol. 26, iss 1, pp. 78–89. <http://doi.org/10.1080/07373930701781686>
12. Akulich P. V., Slizhuk D. S. Thermohydrodynamic Processes in Spray Drying with Convective-Radiation Energy Supply. *Theoretical Foundations of Chemical Technology*, 2021, vol. 55, no. 1, pp. 30–40. <https://doi.org/10.1134/S0040579521010024>
13. Bloch A. G. *Fundamentals of Heat Transfer by Radiation*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1962. 332 p. (in Russian).
14. Tutova E. G., Kuts P. S. *Drying of Products of Microbiological Production*. Moscow, Agropromizdat Publ., 1987. 303 p. (in Russian).
15. Dolinsky A. A., Maletskaya K. D. *Spray Drying: in 2 volumes. Volume 1. Thermophysical Fundamentals. Methods of Intensification and Energy Saving*. Kyiv, Akadempriodika Publ., 2011. 376 p. (in Russian).

## Информация об авторах

Акулич Петр Васильевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси (ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-4559-8996>. E-mail: [akul@hmti.ac.by](mailto:akul@hmti.ac.by)

Седнин Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-8039-3737>. E-mail: [pte@bntu.by](mailto:pte@bntu.by)

Позднякова Марина Игоревна – старший преподаватель кафедры «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника», Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [pte@bntu.by](mailto:pte@bntu.by)

## Information about the authors

Piotr V. Akulich – Dr. Sci. (Engineering), Chief Researcher, A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Science of Belarus (15, Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-4559-8996>. E-mail: [akul@hmti.ac.by](mailto:akul@hmti.ac.by)

Vladimir A. Sednin – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department “Industrial Heat Power Engineering and Heat Engineering” of the Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-8039-3737>. E-mail: [pte@bntu.by](mailto:pte@bntu.by)

Marina I. Pozdnyakova – Senior Lecturer of the Department “Industrial Heat Power Engineering and Heat Engineering”, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [pte@bntu.by](mailto:pte@bntu.by)

**А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев, А. А. Котов**

*Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь*

## **ТЕПЛОМАССОБМЕН В ПРОЦЕССАХ СУШКИ ТОНКИХ НАТУРАЛЬНЫХ КОЖ ВНАКЛЕЙКУ НА ГЛАДКИЕ ПОВЕРХНОСТИ**

**Аннотация.** Изложены результаты исследования тепло- и массообмена в процессе сушки тонкой натуральной кожи внаклейку на гладкую поверхность. Используются результаты решения дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности с постоянными теплофизическими коэффициентами для определения средней температуры в период падающей скорости сушки. Приведены расчетные значения температур для влагоизолированной и свободной к испарению влаги поверхностей кожи. Рассмотрены методы упрощения решений нелинейных уравнений с целью линеаризации этих уравнений для аппроксимации решений с переменными коэффициентами переноса. Использование метода кусочно-ступенчатой аппроксимации коэффициентов переноса с постоянными значениями этих коэффициентов на малых временных интервалах показало, что для малоинтенсивных процессов сушки достаточно точно реализуются решения линейного уравнения теплопроводности, подтверждающие закономерности, полученные опытным путем. Дан расчет длительности сушки по методу Б. С. Сажина. Представлены результаты обработки опытных кривых сушки кож внаклейку. Дана проверка достоверности полученных уравнений и сопоставления эксперимента с расчетными значениями по формулам. Полученные приближенные аналитические решения при достоверных значениях коэффициентов переноса, подтвержденные установленными экспериментальным путем закономерностями, имеют практическое значение. В совокупности с экспериментальными методами аналитические методы позволяют установить оптимальные режимы сушки и более точно обобщать опытные данные.

**Ключевые слова:** натуральная кожа, конвективная сушка, влагосодержание, коэффициент сушки, скорость сушки, температура мокрого термометра, число Био, коэффициент теплопроводности

**Для цитирования:** Ольшанский, А. И. Тепломассообмен в процессах сушки тонких натуральных кож внаклейку на гладкие поверхности / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев, А. А. Котов // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 50–59. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-50-59>

**Anatoli I. Olshanski, Andrei L. Klimentyev, Alexej A. Kotow**

*Vitebsk State Technological University, Vitebsk, Republic of Belarus*

## **HEAT AND MASS TRANSFER IN THE PROCESSES OF DRYING THIN NATURAL LEATHERS PASTED ON SMOOTH SURFACES**

**Abstract.** The results of the study of drying thin natural leather pasted on a smooth surface are presented. The results of solving the differential equation of non-stationary heat conduction with constant thermophysical coefficients are used to determine the average temperature during the period of decreasing drying rate. The calculated values of temperatures for moisture-proof and moisture-free skin surfaces are given. Methods for simplifying solutions of nonlinear equations with the aim of linearizing these equations for approximating solutions with variable transport coefficients are considered. The use of the method of piecewise stepwise approximation of the transfer coefficients with constant values of these coefficients over short time intervals showed that for low-intensity drying processes, the solutions of the linear heat equation are implemented quite accurately, confirming the regularities obtained empirically. The calculation of the duration of drying according to the method of B. S. Sazhin is given. The results of the processing of experimental curves for drying leathers pasted are presented. The reliability of the obtained equations is verified and the experiment is compared with the calculated values using the formulas. The obtained approximate analytical solutions with reliable values of the transfer coefficients, confirmed by experimentally established regularities, are of practical importance. Together with experimental methods, analytical methods make it possible to establish optimal drying regimes and more accurately generalize experimental data.

**Keywords:** natural leather, convective drying, moisture content, drying factor, drying speed, wet thermometer temperature, Bio criterion, coefficient of thermal conductivity

**For citation:** Olshanski A. I., Klimentyev A. L., Kotow A. A. Heat and mass transfer in the processes of drying thin natural leathers pasted on smooth surfaces. *Vesti Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 50–59 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-50-59>

**Введение.** В настоящее время активно проводятся исследования по тепло- и массопереносу в процессах сушки для различных отраслей промышленности. Результаты данной работы отражены, в частности, в [1–3]. Так, в [1] рассматривается математическая модель тепло-массопереноса в процессе сушки влажного материала, в [2, 3] исследуются пути повышения эффективности процессов сушки и массообменных процессов термовлажностной обработки текстильных материалов в производстве кожи и нетканых клееных материалов.

Следует отметить, что на физико-механические свойства готовой высушенной кожи влияют все технологические операции кожевенного производства, но основное влияние оказывает сушка. В процессе сушки натуральных кож происходит удаление из материала влаги, кожа на протяжении всего процесса испытывает усадку, которая особенно при сушке кожи хромового дубления дает значительную усадку по площади до 25–30 % [4–6]. Сушка растянутых на рамах кож не дает хороших результатов [4–6]. При сушке кож в двухфазном состоянии, когда после первой сушки применяется повторное увлажнение и сушка, необратимая потеря площади от усадки остается равной 12–15 % [6]. Однако такой метод сушки усложняет и сам процесс, и конструкцию сушильной камеры [5, 6].

Аналитические решения имеют важное значение тогда, когда они хорошо согласуются с закономерностями, полученными экспериментальным путем, что требует исследований для установления зависимостей коэффициентов переноса от влагосодержания и температуры.

*Цель работы* – показать возможность использования в практических расчетах кинетики сушки результатов аналитических решений.

**Кинетика сушки натуральных кож.** Натуральные кожи относятся к термочувствительным материалам, и основным препятствием для быстрой интенсивной сушки при повышенных температурах является усадка. Поэтому сушка кож проводится при мягких режимах: температуре  $t_c = 30–60$  °С, скорости  $v = 0,5–2,0$  м/с и высоких значениях влагосодержания воздуха  $\varphi = 30–60$  % [4–6].

Конвективная сушка влажных материалов осуществляется нагретым газом или воздухом, при этом температура на поверхности материала в период постоянной скорости сушки равна температуре мокрого термометра  $t_{м.т}$  [7–9]. В случае если одна поверхность материала покрыта влагоизоляционным слоем, через который не происходит испарения влаги, то температура этой поверхности выше  $t_{м.т}$  за счет дополнительного подвода тепла теплообменом через сухую поверхность. Причем чем больше отношение сухой поверхности к влажной, тем больше повышается температура материала по отношению к  $t_{м.т}$  [5, 6, 10, 11].

При сушке кож внаклейку используется сухая фанера, предварительно покрытая лаком. Важную роль играют составы клея при приклеивании кожи к пластине. К клею предъявляются разные требования в зависимости от метода наклеивания кожи (лицевой или бахтармянной стороной). Клеевая смесь должна прикреплять кожу с определенной прочностью для избегания деформации, особенно в первый период сушки [5, 6].

Важную роль при выборе рациональных режимов сушки, типа, размеров и конструкции сушильной установки играет длительность сушки. Сушка отличается большой сложностью, что крайне затрудняет получение аналитических зависимостей для расчета кинетики сушки конкретного материала. Для расчета длительности сушки используются различные приближенные экспериментальные методы, основанные на наиболее общих закономерностях процесса и устойчивых комплексных переменных [4–8].

К таким методам относится и метод, разработанный Б. С. Сажиным [8]. Метод расчета кинетики сушки основан на решении обобщенного уравнения массопередачи, которое применительно к сушке имеет вид [8]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K (\bar{u}_0 - \bar{u}) (\bar{u}_{пр} - u_p), \quad (1)$$

где  $\bar{u}_0$ ,  $\bar{u}$ ,  $\bar{u}_{пр}$ ,  $u_p$  – начальное, текущее, в стадии прогрева и равновесное влагосодержание материала соответственно, кг/кг;  $K$  – коэффициент скорости сушки, мин<sup>-1</sup>.

Произведение  $(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{пр} - u_p)$  представляет собой обобщенную комплексную переменную, основную движущую силу сушки, учитывающую изменение скорости сушки. Коэффициент

скорости сушки  $K$  остается постоянной величиной как в первом, так и во втором периодах сушки, и кривая сушки описывается одним уравнением [8, 9].

Интегрированием уравнения (1) от влагосодержания в стадии прогрева материала  $\bar{u}_{\text{пр}}$  до равновесного  $u_p$  при начальном  $\bar{u}_0$  получим [8]:

$$\tau = \frac{\bar{u}_0}{K(\bar{u}_0 - u_p)} \cdot \ln \frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{\text{пр}} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}})(\bar{u} - u_p)}. \quad (2)$$

Уравнение (2) запишем в виде

$$\tau = \frac{\bar{u}_0}{K(\bar{u}_0 - u_p)} \cdot Z, \quad (3)$$

где параметр  $Z$  рассчитывается следующим образом [8]:

$$Z = \ln \frac{(\bar{u}_0 - \bar{u})(\bar{u}_{\text{пр}} - u_p)}{(\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}})(\bar{u} - u_p)}. \quad (4)$$

В системе координат  $Z = f(\tau)$  кривые сушки представляют собой прямые, угол наклона которых определяет коэффициент скорости сушки  $K$ , а отрезки, отсекаемые по оси  $Z$ , – величину влагосодержания прогрева  $\bar{u}_{\text{пр}}$ . Значения  $\bar{u}_{\text{пр}}$  более точно устанавливаются по кривой сушки  $\tau = f(\bar{u})$  с наличием температурной кривой  $\bar{t} = f(\tau)$ .

Кинетика сушки в период прогрева материала аппроксимируется уравнением вида [8, 9]

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = \frac{\bar{t} - t_{\text{н}}}{t_{\text{м.т}} - t_{\text{н}}} \cdot N, \quad (5)$$

где  $\bar{t}$  – среднееобъемная температура материала, °C;  $t_{\text{н}}$  – начальная температура материала, °C;  $N$  – скорость сушки в первом периоде,  $\text{мин}^{-1}$ .

Интегрированием уравнения (5) определяется время прогрева материала:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{пр}}}{N} \cdot \frac{t_{\text{м.т}} - t_{\text{н}}}{\bar{t} - t_{\text{н}}}. \quad (6)$$

На основе обработки многих опытных данных по конвективной сушке различных капиллярно-пористых влажных материалов Н. С. Михеевой предложено простое уравнение длительности сушки, включая оба периода [6].

Уравнение имеет вид

$$\tau = \frac{1,8}{N} \left( (\bar{u}_0 - u_p) - 0,56\bar{u}_0 \right) \ln \frac{\bar{u}_0}{\bar{u} - u_p}. \quad (7)$$

В уравнениях Б. С. Сажина и Н. С. Михеевой не нужно знать критического влагосодержания материала  $\bar{u}_{\text{кр}}$ , которое для многих материалов зависит от режима сушки [4–9]. Для определения длительности сушки по уравнению (2) необходимо знать только влагосодержание прогрева материала  $\bar{u}_{\text{пр}}$ , а по уравнению (7) – скорость сушки в первом периоде  $N$ . Вычисленные значения скорости сушки по уравнениям (2) и (3) и их сопоставление со значениями, полученными экспериментальным путем, приводятся в таблице.

**Условия сушки и теплообмен.** Сушка натуральных кож внаклейку на гладкую поверхность создает условия, когда с одной свободной поверхности кожи происходит испарение влаги в окружающую среду с наличием периодов постоянной и падающей скорости сушки, а с другой, влагоизолированной, – интенсивность испарения влаги равна нулю.

Неограниченная пластина с наклеенной кожей с начальной температурой  $t_{\text{н}}$  помещается в среду с температурой  $t_{\text{с}} > t_{\text{н}}$ . Теплообмен с поверхностями пластины происходит по закону Ньютона. Со свободной поверхности влага испаряется с интенсивностью  $j_{\text{св}}$ , с другой, влагоизолированной, с интенсивностью  $j_{\text{из}} = 0$ , что создает характерные условия теплообмена [5, 6, 10, 11].

Результаты вычислений температуры и длительности сушки опойка по уравнениям и сопоставление результатов с экспериментальными данными

The results of calculations of the temperature and duration of drying of the flask according to the equations and comparison of the results with experimental data

Пластина $0,9 \times 0,5 \times 1,6 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 500$ кг/м <sup>3</sup> , $m = 0,34$ кг. $\bar{u}_0 = 2,03$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,93$ ; $u_p = 0,125$ ; $\bar{u}_{пр} = 1,87$ ; $N = 0,015$ мин <sup>-1</sup> ; $\bar{\alpha}_{кр} = 16,0$ Вт/м <sup>2</sup> ·°С; $K_{эф} = 0,03$ мин <sup>-1</sup> ; $\tau_1 = 75$ мин; $j_1 = 0,162 \cdot 10^{-3}$ кг/м <sup>2</sup> ·с; $q_1 = 380$ Вт/м <sup>2</sup> . Режим сушки: $t_c = 60$ °С; $v = 0,5$ м/с; $\phi = 30$ %; $t_{м.т} = 30$ °С											
$\bar{u}$	$\bar{u}/\bar{u}_{кр}$	$\lambda_{вл}, \text{Вт/м} \cdot \text{°С}$ (14)	$\bar{\alpha}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ (12)	Ві	$j_{II} \cdot 10^3, \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ (15)	$t_{п.из}, \text{°С}$ (9)	$t_{п.св}, \text{°С}$ (10)	Z (4)	$\tau, \text{мин}$ (экс.)	$\tau, \text{мин}$ (2)	$\tau, \text{мин}$ (7)
0,9	0,97	0,187	15,6	0,044	0,162	37,0	30,0	2,38	86	84,0	83,5
0,8	0,86	0,167	14,5	0,045	0,145	45,2	32,5	2,72	100	96,2	95,7
0,7	0,75	0,156	13,3	0,044	0,126	46,4	33,8	3,11	110	108,7	109,8
0,6	0,64	0,147	12,1	0,042	0,117	47,6	36,3	3,87	130	132,0	130,0
0,5	0,54	0,138	10,7	0,040	0,095	48,7	38,5	4,48	150	153,0	152,7
0,4	0,43	0,131	9,2	0,037	0,077	50,2	41,4	5,33	178	181,0	180,8
0,3	0,32	0,127	7,8	0,034	0,063	52,3	44,5	6,71	225	225,0	224,4
Пластина $0,9 \times 0,5 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 490$ кг/м <sup>3</sup> , $m = 0,33$ кг. $\bar{u}_0 = 2,04$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,96$ ; $u_p = 0,12$ ; $\bar{u}_{пр} = 1,87$ ; $N = 0,013$ мин <sup>-1</sup> ; $\bar{\alpha}_{кр} = 13,5$ Вт/м <sup>2</sup> ·°С; $K_{эф} = 0,026$ мин <sup>-1</sup> ; $\tau_1 = 100$ мин; $j_1 = 0,13 \cdot 10^{-3}$ кг/м <sup>2</sup> ·с; $q_1 = 312$ Вт/м <sup>2</sup> . Режим сушки: $t_c = 50$ °С; $v = 0,5$ м/с; $\phi = 30$ %; $t_{м.т} = 27$ °С											
$\bar{u}$	$\bar{u}/\bar{u}_{кр}$	$\lambda_{вл}, \text{Вт/м} \cdot \text{°С}$ (14)	$\bar{\alpha}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ (12)	Ві	$j_{II} \cdot 10^3, \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ (15)	$t_{п.из}, \text{°С}$ (9)	$t_{п.св}, \text{°С}$ (10)	Z (4)	$\tau, \text{мин}$ (экс.)	$\tau, \text{мин}$ (2)	$\tau, \text{мин}$ (7)
0,8	0,83	0,166	11,9	0,042	0,112	37,8	29,4	2,93	120	118,5	116,5
0,7	0,73	0,155	11,0	0,039	0,110	39,2	30,5	3,35	137	135,5	140,0
0,6	0,62	0,146	9,7	0,036	0,087	40,4	31,2	3,67	150	151,0	152,6
0,5	0,52	0,137	8,4	0,034	0,074	41,5	33,3	4,28	175	176,4	174,8
0,4	0,42	0,130	7,3	0,028	0,062	43,0	35,2	4,89	200	198,4	210,0
0,3	0,32	0,124	6,2	0,022	0,048	44,8	38,4	6,12	250	252,0	254,0
Пластина $0,9 \times 0,5 \times 1,5 \cdot 10^{-3}$ м, $\rho = 510$ кг/м <sup>3</sup> , $m = 0,345$ кг. $\bar{u}_0 = 2,04$ ; $\bar{u}_{кр} = 0,98$ ; $u_p = 0,13$ ; $\bar{u}_{пр} = 1,9$ ; $N = 0,012$ мин <sup>-1</sup> ; $\bar{\alpha}_{кр} = 16$ Вт/м <sup>2</sup> ·°С; $K_{эф} = 0,024$ мин <sup>-1</sup> ; $\tau_1 = 100$ мин; $j_1 = 0,117 \cdot 10^{-3}$ кг/м <sup>2</sup> ·с; $q_1 = 270$ Вт/м <sup>2</sup> . Режим сушки: $t_c = 40$ °С; $v = 0,5$ м/с; $\phi = 30$ %; $t_{м.т} = 24$ °С											
$\bar{u}$	$\bar{u}/\bar{u}_{кр}$	$\lambda_{вл}, \text{Вт/м} \cdot \text{°С}$ (14)	$\bar{\alpha}, \text{Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$ (12)	Ві	$j_{II} \cdot 10^3, \text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$ (15)	$t_{п.из}, \text{°С}$ (9)	$t_{п.св}, \text{°С}$ (10)	Z (4)	$\tau, \text{мин}$ (экс.)	$\tau, \text{мин}$ (2)	$\tau, \text{мин}$ (7)
0,8	0,78	0,165	14,0	0,041	0,094	32,5	25,8	2,89	130	127,7	128,6
0,7	0,69	0,154	12,5	0,038	0,084	33,8	26,4	3,29	142	145,0	146,0
0,6	0,59	0,145	11,4	0,036	0,073	34,7	27,8	3,77	165	167,0	167,0
0,5	0,49	0,136	10,3	0,030	0,062	36,5	29,6	4,38	190	194,6	194,0
0,4	0,39	0,131	8,9	0,028	0,053	37,4	31,7	5,15	225	227,6	227,8
0,3	0,30	0,122	5,6	0,023	0,042	38,2	33,2	6,25	275	278,0	276,7

Примечание:  $\rho$  – плотность материала пластины, кг/м<sup>3</sup>;  $m$  – масса пластины, кг;  $v$  – скорость воздуха, м/с.

В процессе сушки с уменьшением влагосодержания материала теплофизические коэффициенты: теплопроводности  $\lambda_{вл}$ , удельной теплоемкости  $c_{вл}$ , температуропроводности  $a$ , – изменяются. Наибольшее изменение претерпевает коэффициент теплопроводности  $\lambda_{вл}$ . Коэффициент  $a$  изменяется незначительно, поскольку с уменьшением  $\lambda_{вл}$  одновременно уменьшается произведение  $c_{вл} \cdot \rho$ , где  $\rho$  – плотность влажного тела,  $c_{вл}$  – удельная теплоемкость влажного тела [6, 10, 12].

Следовательно, при известной зависимости  $\lambda_{вл} = f(\bar{u})$  задача решается с достаточной точностью. Решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности при постоянных коэффициентах переноса дано А. В. Лыковым [10].

Дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности имеет вид

$$\frac{dt}{d\tau} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \tag{8}$$

краевые условия:

$$\text{при } \tau = 0, t = t_{н}; \text{ при } x = +R, \frac{\partial t}{\partial x} + \frac{\bar{\alpha}}{\lambda_{вл}}(t_c - t_{п}) - \frac{r \cdot j_{св}}{\lambda} = 0; \text{ при } x = -R, j_{из} = 0.$$

Здесь  $R$  – половина толщины образца кожи, м;  $\bar{\alpha}$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/м<sup>2</sup>·°С;  $r$  – теплота парообразования, Дж/кг;  $t_{п}$  – температура на поверхности кожи, °С.

Решение (8) с краевыми условиями при постоянных коэффициентах переноса и значениях теплообменного критерия  $Bi \ll 1$  имеет вид:

для теплоизолированной поверхности кожи при  $j_{из} = 0$

$$t_{п.из} = t_c - \frac{r \cdot j_{св}}{2\bar{\alpha}_{из}} \cdot \left[ 1 + \frac{1}{Bi + 1} \right], \quad (9)$$

где  $\bar{\alpha}_{из}$  – коэффициент теплоотдачи для теплоизолированной поверхности;  
для свободной поверхности кожи

$$t_{п.св} = t_c - \frac{r \cdot j_{св}}{\bar{\alpha}_{исп}} \cdot \frac{1}{Bi + 1}, \quad (10)$$

где  $\bar{\alpha}_{исп}$  – коэффициент теплоотдачи со свободной поверхности кожи.

Технология приклеивания кожи к гладкой поверхности пластины прикрепляет кожу с высокой плотностью, что позволяет пренебречь термическим сопротивлением контактного теплопереноса при соприкосновении гладкой подложки с поверхностью материала.

Интенсивность испарения влаги со свободной поверхности кожи в периоде постоянной скорости сушки устанавливается из уравнений

$$\frac{r \cdot j_{св}}{\bar{\alpha}_{исп}} = t_c - t_{м.т}, \quad j_{св} = \frac{\bar{\alpha}_{исп} \cdot (t_c - t_{м.т})}{r}. \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  при конвективной сушке кожи определяется приближенно по формуле для теплообменного критерия Нуссельта [9, 13, 14]

$$Nu = 0,9 \cdot Re^{0,5} \left( \frac{T_c}{T_{м.т}} \right)^2 \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,65}, \quad (12)$$

где критерий Нуссельта  $Nu = \frac{\bar{\alpha}_{исп} \cdot l}{\lambda_{воз}}$ ; критерий Рейнольдса  $Re = \frac{v \cdot l}{\nu_{воз}}$ ;  $T_c$ ,  $T_{м.т}$  – абсолютные температуры сухого и мокрого термометров, К;  $l$  – линейный размер материала по набеганию потока воздуха, м;  $\lambda_{воз}$ ,  $\nu_{воз}$  – соответственно коэффициенты теплопроводности, Вт/м·°С, и кинематической вязкости, м<sup>2</sup>/с, воздуха по таблицам в зависимости от температуры [9, 13].

При обтекании плоской сухой поверхности пластины при значении  $Re < 5 \cdot 10^5$  критериальное уравнение для воздуха имеет вид [9, 13]

$$Nu = 0,57 \cdot Re^{0,5}. \quad (13)$$

Число Био ( $Bi$ ) определяется по зависимости

$$Bi = \frac{\bar{\alpha}_{исп} \cdot R}{\lambda_{вл}}.$$

Обработкой данных по коэффициенту теплопроводности влажных натуральных кож, представленных в [4, 5], нами была получена зависимость для коэффициента теплопроводности влажной кожи [11, 12]

$$\lambda_{вл} = \lambda_0 + 1,31 \cdot 10^{-3} \cdot \bar{t} \cdot \bar{u} \cdot \exp(\bar{u}), \quad (14)$$

где  $\lambda_0$  – теплопроводность абсолютно сухой кожи. Значения коэффициентов теплопроводности сухой кожи для разных материалов следующие: рантовая подошва –  $\lambda_0 = 0,122$  Вт/м·°С; красная дубная юфта –  $\lambda_0 = 0,11$  Вт/м·°С; опоек хромового дубления –  $\lambda_0 = 0,095$  Вт/м·°С; юфта танидного дубления –  $\lambda_0 = 0,115$  Вт/м·°С. Решение нелинейного уравнения нестационарной теплопроводности при переменных коэффициентах переноса связано с большими трудностями. Обзоры мето-

дов аппроксимации, линеаризации, итерации при решении нелинейных уравнений нестационарной теплопроводности изложены в [14–18].

Процессы сушки натуральных кож являются малоинтенсивными, и значительных изменений температуры за малые промежутки времени не наблюдается.

При значениях числа  $Bi \ll 1$  лимитирующее влияние на условия сушки оказывает внешний теплообмен поверхности материала с окружающей средой. Внутренний теплообмен влияет слабо (внешняя задача) [4, 9, 12], и можно допустить, что испарение влаги происходит полностью у поверхности тела.

Для уравнений (9) и (10) при определении температур применялась, как в [17, 18], кусочно-ступенчатая аппроксимация для коэффициентов  $\lambda_{вл}$ ,  $c_{вл}$ ,  $a$  и  $\bar{\alpha}$  с постоянными их значениями на расчетных временных интервалах [13–15]. Таким образом, при переходе от одного интервала к следующему учитывалось изменение коэффициентов переноса от влагосодержания и температуры.

**Обработка опытных кривых сушки хромового опойка внаклейку.** На рис. 1–3 изображены кривые сушки наклеенного на сухую фанеру опойка в полупроизводственных условиях сушки при различных режимах [5]. Температурные кривые построены по формулам (9) и (10) для влагоизолированной и свободной поверхностей кожи. Значения температур, вычисленных по формулам, приведены в таблице.

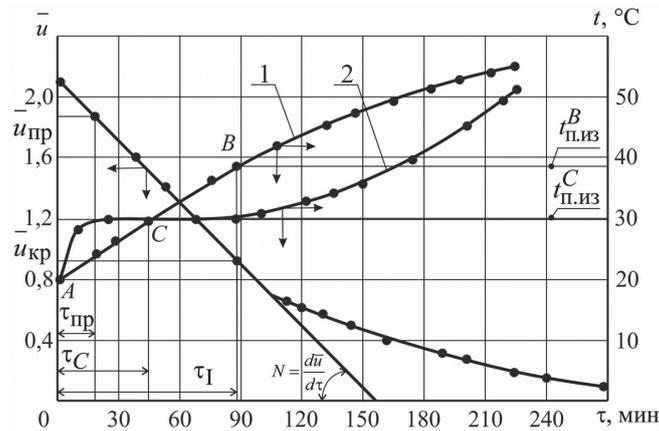


Рис. 1. Кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  для влагоизолированной (кривая 1) и свободной к испарению влаги (кривая 2) поверхностей при сушке опойка внаклейку для режима сушки:  $t_c = 60^\circ\text{C}$ ;  $v = 0,5$  м/с;  $\phi = 30\%$  [2]

Fig. 1. The drying curves  $\bar{u} = f(\tau)$  and temperature curves  $\bar{t} = f(\tau)$  for moisture-proof (curve 1) and moisture-free (curve 2) surfaces when drying of glued flask in the drying mode:  $t_c = 60^\circ\text{C}$ ;  $v = 0.5$  m/s;  $\phi = 30\%$  [2]

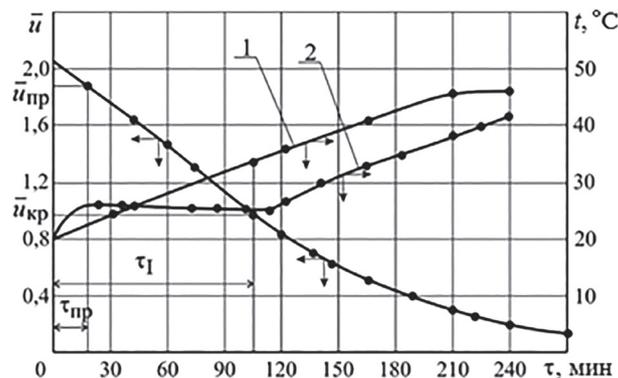


Рис. 2. Кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  для влагоизолированной (кривая 1) и свободной к испарению влаги (кривая 2) поверхностей при сушке опойка внаклейку для режима сушки:  $t_c = 50^\circ\text{C}$ ;  $v = 0,5$  м/с;  $\phi = 30\%$  [2]

Fig. 2. The drying curves  $\bar{u} = f(\tau)$  and temperature curves  $\bar{t} = f(\tau)$  for moisture-proof (curve 1) and moisture-free (curve 2) surfaces when drying of glued flask in the drying mode:  $t_c = 50^\circ\text{C}$ ;  $v = 0.5$  m/s;  $\phi = 30\%$  [2]

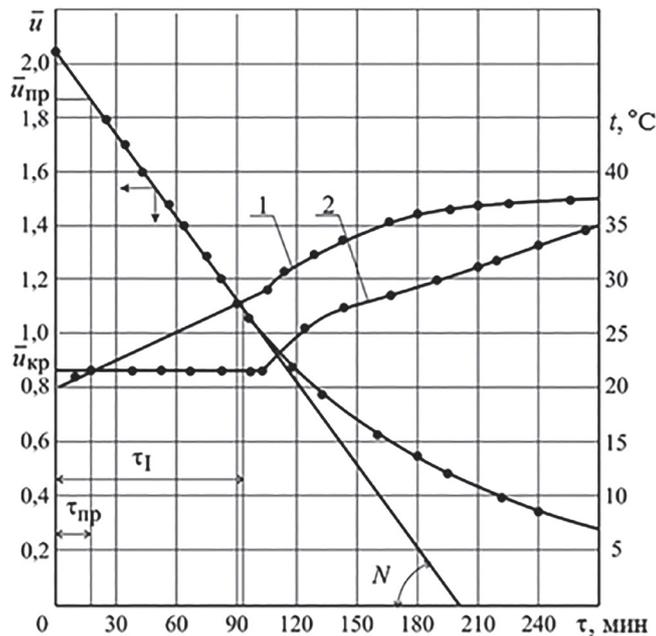


Рис. 3. Кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  для влагоизолированной (кривая 1) и свободной к испарению влаги (кривая 2) поверхностей при сушке опойка внаклейку для режима сушки:  $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 0,5\text{ м/с}$ ;  $\phi = 30\text{ \%}$  [2]

Fig. 3. The drying curves  $\bar{u} = f(\tau)$  and temperature curves  $\bar{t} = f(\tau)$  for moisture-proof (curve 1) and moisture-free (curve 2) surfaces when drying of glued flask in the drying mode:  $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $v = 0.5\text{ м/s}$ ;  $\phi = 30\text{ \%}$  [2]

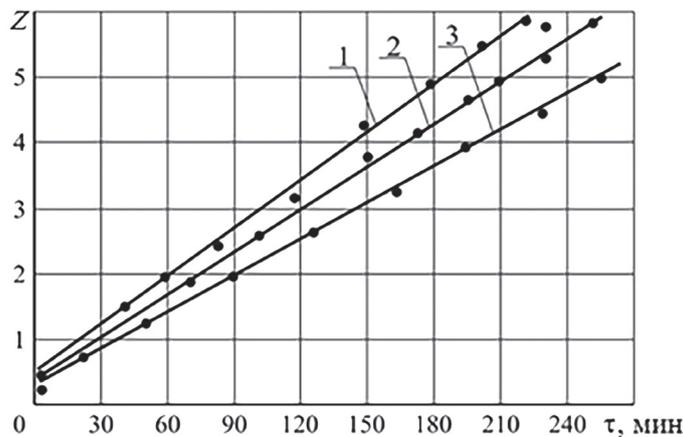


Рис. 4. Зависимость параметра  $Z = f(\tau)$  для процессов сушки опойка внаклейку при различных режимах сушки (режимы сушки даны в таблице)

Fig. 4. The dependence of the parameter  $Z = f(\tau)$  in the process of drying of glued flask with a sticker at various drying modes (drying modes are indicated in the table)

Интенсивность испарения влаги со свободной поверхности кожи во втором периоде сушки рассчитывалась по формуле [4, 11, 17]

$$j_{II}^{CB} = \rho \cdot R_v \cdot N \left( \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right), \tag{15}$$

где интенсивность испарения влаги в первом периоде  $j_I^{CB} = \rho \cdot R_v \cdot N$ ;  $R_v$  – отношение объема тела к поверхности.

Эффективный коэффициент сушки  $K_{\phi}$  по методу Б. С. Сажина определялся графическим построением зависимостей для параметра  $Z = f(\tau)$ , где  $Z$  – вычислялся по соотношению (4). На рис. 4 даны зависимости  $Z = f(\tau)$  для процессов сушки опойка, а значения  $Z$  приведены в таблице.

Зависимости параметра  $Z = f(\tau)$  представляют собой прямые в системе координат  $\ln Z = f(\tau)$ . Закономерности изменения температур на влагоизолированной и свободной поверхностях кожи при сушке внаклейку полностью согласовываются с результатами эксперимента. Установлено, что для влагоизолированной поверхности кожи при отсутствии испарения влаги температура  $t_{м.т}$  всегда выше. Это происходит за счет дополнительного подвода тепла теплообменом через сухую поверхность.

Следует отметить, что в условиях обычной сушки кожи при поверхности испарения  $2F$  скорость сушки больше, чем в случае, когда испарение происходит только с одной стороны, но, как показывают опыты, не в 2 раза.

Из рис. 1–3 видно, что при сушке внаклейку градиенты температуры по сечению кожи значительно выше, чем при двусторонней сушке, при этом градиенты температуры совпадают по направлению с градиентами влагосодержания, и термический перенос влаги усиливает скорость сушки. Поэтому скорость сушки при испарении влаги с одной поверхности уменьшается не в 2 раза, а в 1,2–1,3 [5, 6].

Уравнение (9) в периоде постоянной скорости сушки для влагоизолированной поверхности кожи при определении температуры не применимо. Температуру в этом периоде можно определить из уравнения теплового баланса, предполагая, что она изменяется линейно.

Обозначим участок на кривой нагрева  $I$  на рис. 1 в первом периоде сушки для влагоизолированной поверхности через  $A-B$  и запишем уравнение теплового баланса для точки  $C$ , лежащей на этой прямой, следующим образом:

$$\bar{\alpha}_{из} \cdot \tau_1 \cdot (t_{п.из}^B - t_{п.из}^C) = \bar{\alpha}_{из} \cdot \tau_C \cdot (t_{п.из}^C - t_n), \quad (16)$$

где  $\tau_1$  – время сушки от начальной температуры  $t_n$  в точке  $A$  до температуры  $t_{п.из}^B$  в точке  $B$  для первого периода сушки влагоизолированной поверхности,  $\tau_C$  – время сушки от начальной температуры  $t_n$  в точке  $A$  до температуры  $t_{п.из}^C$  (точка  $C$ ).

Правая часть уравнения (16) представляет собой поток тепла, нагревающий влагоизолированную поверхность кожи от начальной температуры  $t_n$  (точка  $A$ ) до температуры  $t_{п.из}^C$  (точка  $C$ ) за время сушки  $\tau_C$ .

Левая часть уравнения (16) – поток тепла, идущий на нагрев поверхности кожи от температуры  $t_{п.из}^C$  в точке  $C$  до температуры  $t_{п.из}^B$  в точке  $B$  за время первого периода сушки влагоизолированной поверхности  $\tau_1$ . Линия  $A-B$  представляет температурную кривую  $t_n = f(\tau)$  для влагоизолированной поверхности в первом периоде сушки. Видно, что температура поверхности кожи непрерывно увеличивается за счет дополнительного притока тепла из-за теплообмена через сухую поверхность.

Температура поверхности кожи в точке  $C$  из уравнения баланса тепла (15) равна

$$t_{п.из}^C = \frac{\tau_1 \cdot t_{п.из}^B + \tau_C \cdot t_n}{\tau_1 + \tau_C}. \quad (17)$$

Для режима сушки опойка  $t_c = 60$  °C;  $v = 0,5$  м/с;  $\varphi = 30$  % (см. рис. 1) для конца первого периода сушки влагоизолированной поверхности кожи (точка  $B$ )  $\tau_1 = 5100$  с, а температура  $t_{п.из}^B = 37$  °C. Время сушки от начальной температуры  $t_n = 20$  °C до температуры  $t_{п.из}^B$  в точке  $C$  составляет  $\tau_C = 2700$  с. Температура в точке  $C$ , лежащей на прямой  $A-B$ , равна

$$t_{п.из}^C = \frac{5100 \cdot 37 + 2700 \cdot 20}{2700 + 5100} \approx 30,4 \text{ °C}.$$

Вычисленная температура в точке  $C$  практически совпадает с опытной, следовательно в первом периоде для влагоизолированной поверхности температура изменяется линейно.

Время прогрева при сушке опойка внаклейку при влагосодержании прогрева  $\bar{u}_{пр}$  по формуле (6) для данного режима сушки составляет

$$\tau_{пр} = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{пр}}{N} \cdot \frac{t_{м.т} - t_n}{t - t_n} = \frac{2,03 - 1,85}{0,013} \cdot \frac{30 - 20}{28,5 - 20} = 15,1 \text{ мин.} \quad (18)$$

Таким образом, время прогрева материала практически совпадает с экспериментом.

**Заклучение.** Аналитическое решение дифференциального уравнения нестационарной теплопроводности для натуральной кожи с переменными теплофизическими характеристиками с применением упрощающих методов кусочно-ступенчатой аппроксимации и итерации показало возможность использования таких аналитических решений для описания низкоинтенсивных процессов конвективной сушки тонких плоских влажных материалов.

Приближенные аналитические решения при достоверных значениях коэффициентов переноса в случае, когда они подтверждают закономерности, установленные экспериментальным путем, имеют практическое значение. В совокупности с экспериментальными методами аналитические методы позволяют установить оптимальные режимы сушки и более точно обобщить опытные данные.

### Список использованных источников

1. Натареев, О. С. Теплоперенос в процессе конвективной сушки влажного материала / О. С. Натареев, Н. Р. Коксина, С. В. Натареев // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2015. – Т. 58, вып. 2. – С. 67–72.
2. Процессы сушки и термовлажностной обработки в текстильной и легкой промышленности / М. Г. Балыхин [и др.] // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Междунар. Лыковских науч. чтений. – М., 2015. – С. 193–204.
3. Кошелева, М. К. Особенности процесса сушки нетканых текстильных материалов / М. К. Кошелева, С. П. Рудобашта // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сб. науч. ст. Первых Междунар. Лыковских науч. чтений. – М., 2015. – С. 205–210.
4. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 590 с.
5. Лыков, А. В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А. В. Лыков. – М.: Гизлегпром, 1938. – 776 с.
6. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
7. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
8. Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
9. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Белорус. наука, 2010. – 443 с.
10. Лыков, А. В. Теория сушки капиллярно-пористых коллоидных материалов пищевой промышленности / А. В. Лыков, Л. Я. Ауэрман. – М.: Пищепромиздат, 1946. – 286 с.
11. Ольшанский, А. И. Исследование сушки натуральной кожи методом регулярного режима и обобщенными комплексными переменными / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2017. – № 1 (32). – С. 88–98.
12. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики конвективной сушки натуральных кож / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та. – 2018. – № 1 (34). – С. 49–62.
13. Михеев, М. А. Основы теплопередачи / М. А. Михеев, И. М. Михеева. – М.: Энергия, 1973. – 600 с.
14. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1967. – 600 с.
15. Пехович, А. И. Расчеты теплового режима твердых тел / А. И. Пехович, В. М. Жидких. – Л.: Энергия, 1968. – 304 с.
16. Хрусталева, Б. М. Тепло- и массообмен: учеб. пособие: в 2 ч. / Б. М. Хрусталева [и др.]; под общ. ред. А. П. Ненчука. – Минск: БНТУ, 2009. – Ч. 2. – 274 с.
17. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
18. Рудобашта, С. П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов // Инженер.-физ. журн. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705–714.

### References

1. Natareev O. S., Kokina N. R., Natareev S. V. Heat transfer in convective drying of wet material. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Khimiya i Khimicheskaya Tekhnologiya = ChemChemTech*, 2015, vol. 58, iss. 2, pp. 67–72 (in Russian).
2. Balyhin M. G., Razumeev K. E., Kosheleva M. K., Zakharova A. A. The processes of drying and hygrothermal processing in the textile and light industry. *Aktual'nye problemy sushki i termovlazhnostnoi obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse: sbornik nauchnykh statei Pervykh Mezhdunarodnykh Lykovskikh nauchnykh chtenii* [Actual Problems of Drying and Thermal Moisture Treatment of Materials in Various Industries and Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Articles of the First International Lyikov Scientific Readings]. Moscow, 2015, pp. 193–204 (in Russian).
3. Kosheleva M. K., Rudobashta S. P. The features of the drying process of nonwoven textile materials. *Aktual'nye problemy sushki i termovlazhnostnoi obrabotki materialov v razlichnykh otraslyakh promyshlennosti i agropromyshlennom komplekse: sbornik nauchnykh statei Pervykh Mezhdunarodnykh Lykovskikh nauchnykh chtenii* [Actual Problems of Drying

and Thermal Moisture Treatment of Materials in Various Industries and Agro-Industrial Complex: Collection of Scientific Articles of the First International Lykov Scientific Readings]. Moscow, 2015, pp. 205–210 (in Russian).

4. Lykov A. V. *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 590 p. (in Russian).
5. Lykov A. V. *Kinetics and Dynamics of Drying and Moistening Processes*. Moscow, Gizlegprom Publ., 1938. 776 p. (in Russian).
6. Kavkazov Yu. L. *Heat and Mass Transfer in the Technology of Leather and Shoes*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
7. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
8. Sazhin B. S. *Basics of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 320 p. (in Russian).
9. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchangers*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
10. Lykov A. V. *Theory of Drying Capillary-Porous Colloidal Materials of the Food Industry*. Moscow, Pishhepromizdat Publ., 1946. 286 p. (in Russian).
11. Olshanski A. I., Klimentyev A. L. The study of the drying of natural leather by the method of regular mode and generalized complex variables. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2017, no. 1 (32), pp. 88–98 (in Russian).
12. Olshanski A. I., Klimentyev A. L. Study of the kinetics of convective drying of natural leathers. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Vestnik of Vitebsk State Technological University*, 2018, no. 1 (34), pp. 49–62 (in Russian).
13. Miheev M. A. *Fundamentals of Heat Transfer*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 600 p. (in Russian).
14. Lykov A. V. *Theory of Thermal Conductivity*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1967. 600 p. (in Russian).
15. Pehovich A. I. *Calculations of the Thermal Regime of Solids*. Leningrad, Energiya Publ., 1968. 304 p. (in Russian).
16. Hrustalev B. M. *Heat and Mass Transfer. Part 2*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2009. 274 p. (in Russian).
17. Rudobashta S. P. *Mass and Heat Transfer in Systems with a Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
18. Rudobashta S. P. Calculation of the kinetics of drying disperse materials on the basis of analytical methods. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2010, vol. 83, no. 4, pp. 753–763. <https://doi.org/10.1007/s10891-010-0394-3>

### Информация об авторах

*Ольшанский Анатолий Иосифович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Теплоэнергетика», Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: [te.vstu@mail.ru](mailto:te.vstu@mail.ru).

*Климентьев Андрей Леонидович* – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения», Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-9535-2599>. E-mail: [klimentyev.vstu@gmail.com](mailto:klimentyev.vstu@gmail.com), [tm@vstu.by](mailto:tm@vstu.by).

*Котов Алексей Анатольевич* – ассистент кафедры «Теплоэнергетика», Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: [te.vstu@mail.ru](mailto:te.vstu@mail.ru)

### Information about the authors

*Anatoli I. Olshanski* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor at the Department of Heat Power Engineering, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: [te.vstu@mail.ru](mailto:te.vstu@mail.ru).

*Andrei L. Klimentyev* – Senior Lecturer at the Department of Mechanical Engineering, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-9535-2599>. E-mail: [klimentyev.vstu@gmail.com](mailto:klimentyev.vstu@gmail.com), [tm@vstu.by](mailto:tm@vstu.by).

*Alexej A. Kotow* – Assistant at the Department of Heat Power Engineering, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: [te.vstu@mail.ru](mailto:te.vstu@mail.ru)

**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**  
**RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING**

УДК 621.396.96  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-60-71>

Поступила в редакцию 26.10.2022  
Received 26.10.2022

**П. А. Хмарский<sup>1</sup>, А. С. Солонар<sup>2</sup>, А. О. Наумов<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*  
<sup>2</sup>*Военная академия Республики Беларусь, Минск, Республика Беларусь*

**УСТРОЙСТВО ТРАЕКТОРНОЙ ОБРАБОТКИ ДЛЯ ИНДИКАТОРНОГО КАНАЛА  
РАДИОТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ БЛИЖНЕЙ НАВИГАЦИИ**

**Аннотация.** Рассмотрены особенности работы индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации (РСБН, на примере системы РСБН-4). Выявлено, что существенным недостатком индикаторного канала РСБН является низкая точность определения навигационных параметров (азимута и наклонной дальности летательного аппарата) по сравнению с бортовой аппаратурой. Показано, что в качестве одного из способов повышения точности измерения координат летательного аппарата в индикаторном канале можно использовать траекторную обработку радионавигационной информации. Целью данной обработки является оценка параметров движения летательного аппарата, находящегося в зоне наблюдения РСБН, на основе измерений его мгновенного положения для определения траектории на интервале измерений и прогнозирования его последующего движения. Структура устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в значительной мере может повторять структуры аналогичных устройств, используемых при обработке радиолокационной информации с учетом особенностей работы индикаторного канала. Разработана структура траекторной обработки и отмечены ее особенности на примере отечественной системы РСБН-4. Проведенное математическое моделирование подтвердило возможность значительного повышения точности измерения координат летательного аппарата по сравнению с существующим индикаторным каналом РСБН-4Н.

**Ключевые слова:** траекторная обработка, вторичная обработка радионавигационной информации, сопровождение целей, радиотехническая система ближней навигации, индикаторный канал, радиомаяк, фильтр Калмана

**Для цитирования:** Хмарский, П. А. Устройство траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации / П. А. Хмарский, А. С. Солонар, А. О. Наумов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 60–71. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-60-71>

**Petr A. Khmarskiy<sup>1</sup>, Andrei S. Solonar<sup>2</sup>, Alexander O. Naumov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*  
<sup>2</sup>*Military Academy of the Republic of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*

**DEVICE OF TRACKING PROCESSING FOR INDICATOR CHANNEL OF SHORT-RANGE RADIO  
NAVIGATION SYSTEMS**

**Abstract.** Features of the indicator channel of the short-range radio navigation systems (for example, the RSBN-4 system) are considered. It was revealed that a significant shortcoming of the indicator channel of the short-range radio navigation is the low accuracy of determining the navigation parameters (azimuth and inclined range of the aircraft) in comparison with on-board equipment. It is shown that one of the possible ways to increase the accuracy of measuring the coordinates of the aircraft in the indicator channel is the use of trajectory processing of radionavigation information whose purpose is to estimate the parameters of the motion of an aircraft in the short-range radio navigation observation zone on the basis of measurements of its instant position for determining the trajectory in the measurement interval and predicting his subsequent movement. The structure of the device for trajectory processing of the indicator channel RSBN can to a great extent repeat

the structures of similar devices used in the processing of radar information, taking into account the features of the operation of the indicator channel. The structure of trajectory processing is developed and its features are noted on the example of the system RSBN-4. The performed mathematical modeling confirmed the possibility of a significant increase in the accuracy of the measurement of the coordinates of the aircraft in comparison with the existing indicator channel RSBN-4N.

**Keywords:** trajectory processing, secondary processing of radionavigation information, target tracking, short-range navigation radio system, indicator channel, radio beacon, Kalman filter

**For citation:** Khmarskiy P. A., Solonar A. S., Naumov A. O. Device of tracking processing for indicator channel of short-range radio navigation systems. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 60–71 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-60-71>

**Введение.** Радиотехнические системы ближней навигации (РСБН) – важная составная часть системы радиотехнического обеспечения полетов гражданской и государственной авиации [1, 2]. Такая система предназначена для определения навигационных параметров летательного аппарата (ЛА) в полярной системе координат – азимута и наклонной дальности по отношению к точке стояния наземного радиомаяка РСБН, выполняющего роль опорной станции (рис. 1). В настоящее время на постсоветском пространстве наиболее широкое применение получила система РСБН-4, а за рубежом – VOR/DME (для гражданской и военной авиации) и TACAN (для военной авиации США). Все перечисленные РСБН имеют в своем составе два независимых друг от друга канала: азимутальный и дальномерный.

Помимо этого, в состав систем РСБН-4 и TACAN включается индикаторный канал, обеспечивающий определение указанных навигационных параметров по отображаемым на индикаторе кругового обзора (ИКО) отметкам летательных аппаратов, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН. Информация, выдаваемая на ИКО РСБН, используется для решения задач диспетчерской службы [1]: оценки воздушной обстановки; индивидуального опознавания; управления полетами в районе аэродрома. Ошибки измерения полярных координат по данным индикаторного канала РСБН существенно больше, чем бортовой аппаратуры РСБН. Для примера ошибка определения координат на борту ЛА с бортовой аппаратурой РСБН-6С (7С), составляет: по азимуту –  $\sigma_\theta = \pm 0,25^\circ$ ; по дальности –  $\sigma_R = \pm 200 \text{ м} \pm 0,33 \% R$  (где  $R$  – расстояние от ЛА до радиомаяка) [1]. А ошибка, получаемая при помощи индикаторного канала РСБН-4Н, составляет [1]: по азимуту –  $\sigma_\theta = \pm 1^\circ$ ; по дальности –  $\sigma_R = \pm 3 \text{ км}$  на масштабе развертки 100 км;  $\sigma_R = \pm 5 \text{ км}$  на масштабе развертки 400 км. Для модернизированного варианта РСБН-4НМ (Россия; информацию о ней см.: <https://katalog-rek.ru/catalog/228/1160/>) ошибки составляют:  $\sigma_R = \pm 1,5 \text{ км}$  (на масштабе 50 км);  $\sigma_R = \pm 2 \text{ км}$  (на масштабе 100 км);  $\sigma_R = \pm 3 \text{ км}$  (на масштабе 200 км);  $\pm 6 \text{ км}$  (на масштабе 400 км). Ошибка по азимуту для РСБН-4НМ составляет  $\sigma_\theta = \pm 1^\circ$ . В условиях возросшей на порядок интенсивности полетов повышаются требования к навигационному обеспечению авиации, возможности которого во многом ограничиваются значительными ошибками измерения координат ЛА по данным индикаторного канала РСБН.

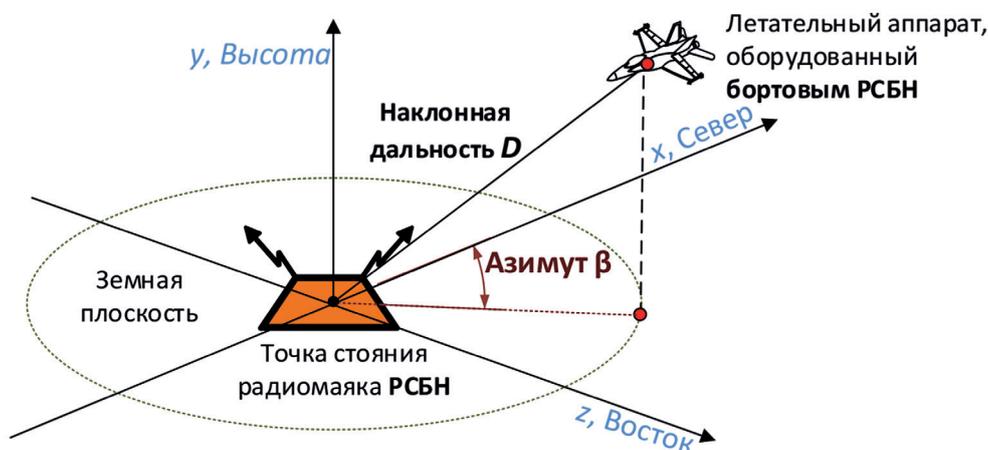


Рис. 1. Навигационные параметры, определяемые радиотехнической системой ближней навигации

Fig. 1. Navigation parameters determined by the short-range radio engineering system

Одним из возможных способов повышения точности измерения координат ЛА в индикаторном канале является использование траекторной обработки радионавигационной информации. Цель данной обработки заключается в оценке параметров движения ЛА, находящегося в зоне наблюдения РСБН, на основе измерений его мгновенного положения для определения траектории на интервале измерений и прогнозирования его последующего движения. Структура устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в значительной мере может повторять структуры аналогичных устройств, используемых при обработке радиолокационной и оптиколокационной информации [3–7] с учетом особенностей его работы. Стоит отметить, что особенности построения и принципы работы устройства траекторной обработки радионавигационной информации для индикаторного канала РСБН в известной литературе не рассмотрены.

**Особенности работы индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации, существенные для траекторной обработки (на примере системы РСБН-4).** Чтобы построить системы траекторной обработки, необходимо проанализировать принципы работы источника информации для нее. В качестве такого источника в нашем случае будем рассматривать индикаторный канал системы РСБН-4, который обеспечивает отображение на стационарном и выносном (в составе командно-диспетчерского пункта) ИКО радиомаяка воздушной обстановки в зоне действия системы, то есть наклонную дальность и азимут ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН и работающих с конкретным радиомаяком РСБН-4Н [1].

Особенности построения и функционирования индикаторного канала системы РСБН-4 удобно рассматривать, используя структурную схему, приведенную на рис. 2. Для оценки наклонной дальности и азимута ЛА на антенну бортового приемника от наземной аппаратуры индикаторного канала (радиомаяка РСБН-4Н) поступают следующие сигналы [1]:

непрерывный азимутальный сигнал, излучаемый направленной вращающейся со стабильной скоростью ( $\Omega_{\text{ск}} = 100$  об/мин) антенной А1 с двухлепестковой диаграммой направленности (ДН);

импульсные опорные сигналы «35» и «36», излучаемые всенаправленной антенной азимутально-опорных передатчиков А2;

импульсные сигналы «Запрос индикации» (ЗИ, или «180»), излучаемые всенаправленной антенной импульсных передатчиков дальномерного канала А2.

Использование импульсных сигналов «35» и «36» позволяет маркировать следующие моменты времени:

момент пересечения минимумом (провалом) двухлепестковой ДН азимутальной антенны А1 азимутов, кратных  $10^\circ$ ;

момент пересечения минимумом (провалом) ДН этой же антенны северного направления истинного меридиана, проходящего через центр вращения азимутальной антенны, – так называемый сигнал «Север», следующий с частотой вращения азимутальной антенны А1 (1,66 Гц).

Сигналы ЗИ маркируют моменты пересечения минимумом (провалом) двухлепестковой ДН азимутальной антенны А1 азимутов, кратных  $2^\circ$ , и следуют с частотой 300 Гц.

В момент попадания ЛА в минимум (провал) диаграммы направленности азимутальной антенны радиомаяка на выходе бортового приемного устройства формируется (выделяется) азимутальный сигнал. Одновременно с этим импульсный передатчик дальномерного канала радиомаяка формирует трехимпульсный код сигнала ЗИ («180»), который через всенаправленную антенну передается на ЛА.

Бортовая схема выделения из всех принятых импульсов сигнала ЗИ выделяет только один, который следует сразу за азимутальным сигналом. Затем выделенный импульс сигнала ЗИ кодируется также трехимпульсным кодом сигнала «Ответ индикации» и передается на радиомаяк РСБН-4Н. Вследствие этого на экране ИКО радиомаяка появляется видеоотметка от ЛА.

При этом запуск радиальной развертки ИКО осуществляется импульсами «180» с задержкой на  $\Delta t_{\text{декод}}$  относительно запросных сигналов, которая для РСБН-4 составляет 47,6 мкс [1]. Такая задержка запуска необходима для компенсации времени декодирования сигналов «Запрос индикации» в бортовом оборудовании и сигналов «Ответ индикации» в наземном оборудовании радиомаяка. Оценка дальности до ЛА в индикаторном канале определяется по временной задержке между сигналами «Запрос индикации» и «Ответ индикации» с учетом значения  $\Delta t_{\text{декод}}$ .

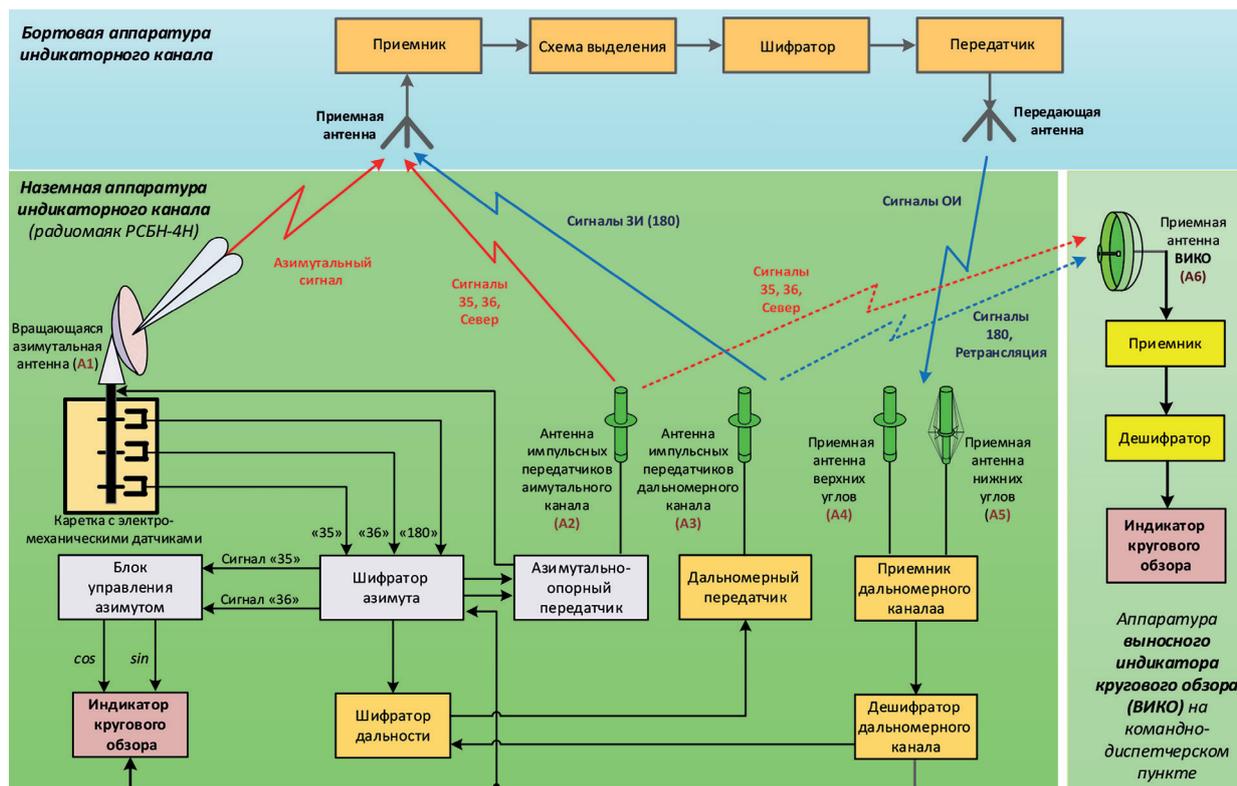


Рис. 2. Обобщенная структурная схема индикаторного канала РСБН-4Н

Fig. 2. Generalized block diagram of the RSBN-4N indicator channel

Для синхронного вращения развертки на ИКО с диаграммой направленности азимутальной антенны в индикаторном канале формируется синусно-косинусное развертывающее напряжение при помощи: сигналов «35», «36» (в аппаратуре ИКО) или метода цифровой аппроксимации синусоидальных функций при равномерном квантовании по времени сигналами «180» (в аппаратуре ВИКО Е-327) [1].

Реальная точность разового оценивания наклонной дальности в индикаторном канале будет ограничиваться: разрешающей способностью по дальности; отношением сигнал/шум на выходе приемного устройства; нестабильностью временной задержки дальномерных сигналов  $\Delta t_{\text{декод}}$  в бортовой и наземной аппаратуре. Расчеты показывают, что реальное значение среднеквадратического отклонения (СКО) разового оценивания дальности для индикаторного канала РСБН-4 может составлять 10–45 м в зависимости от условий наблюдения, что существенно выше точности при ручном съеме координат. В большинстве известных индикаторных каналов РСБН отсутствует автоматическое разовое оценивание наклонной дальности.

Измерение азимута существенно отличается от измерения наклонной дальности, так как отметка от ЛА может находиться только на двухградусной развертке азимута (сигналы «Запрос индикации»), от которых на борту формируется сигнал «Ответ индикации», следуют через  $2^\circ$ . При этом диапазон изменения ошибки измерения азимута будет составлять от 0 до  $2^\circ$ . Для центрирования данной ошибки (получения погрешности измерения азимута  $\pm 1^\circ$  со средним значением  $0^\circ$ ) азимутальный масштаб сдвигается на  $1^\circ$ . Таким образом, в индикаторном канале РСБН-4 происходит «загрубление» точности азимута и введение автоматического разового оценивания не позволит существенно повысить его значение.

**Обобщенная структура устройства траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации.** По аналогии с принципами обработки радиолокационной информации процесс обработки радионавигационной информации, можно разделить на первичную, вторичную и третичную обработки [2, 5]. *Первичная* обработка радионавигационной информации для индикаторного канала РСБН будет заключаться в принятии

решения о наличии или отсутствии ЛА, оборудованного бортовой аппаратурой РСБН, в некотором элементе пространства, разрешении нескольких близко расположенных ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН, а также оценке их мгновенного положения (азимута и наклонной дальности) за один обзор азимутальной вращающейся антенны А1. Дальнейший анализ результатов первичной обработки с использованием первичных измерений, полученных на нескольких обзорах, может проводиться с целью формирования оценок параметров движения ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН и находящихся в зоне действия радиолокационного средства. Это является задачей *вторичной обработки* радионавигационной информации, которую зачастую называют траекторной. К траекторной обработке также относят решение задачи объединения информации от нескольких источников (*третичная обработка*).

Траекторная (вторичная) обработка в индикаторном канале РСБН при ее реализации затрудняется рядом факторов, негативно сказывающихся на ее качестве и требующих принятия специальных мер по их устранению или учету [3]. Такими факторами являются:

- погрешности радиолокационных измерений наклонной дальности ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН;

- скачкообразные измерения оценок азимута ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН, в пределах  $\pm 1^\circ$ ;

- возможность пропуска отметки на этапе первичной обработки (при малом отношении сигнал/шум или выходе из зоны видимости);

- неизвестный закон движения ЛА, который может совершать непредвиденные маневры;

- возможность наблюдения групповой цели, под которой понимается совокупность нескольких неразрешаемых ЛА, совершающих совместный полет на небольшом удалении друг от друга;

- возможность появления в зоне наблюдения новых ЛА и исчезновения старых;

- наличие аномальных разовых оценок ЛА, обусловленных существованием внутрисистемных синхронных и несинхронных помех.

Из изложенного очевидно, что система РСБН работает по принципам вторичной радиолокации (активный запрос – активный ответ), а значит, для нее характерно отсутствие мешающих отражений. Этот фактор позволяет обоснованно отказаться от использования карт помех и алгоритмов межобзорной селекции, а также существенно упростить другие элементы системы траекторной обработки – устройства обнаружения и сброса траекторий, отождествления оценок с траекториями.

С учетом перечисленных особенностей разработана структурная схема траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации на примере системы РСБН-4 (рис. 3). Кроме устройств, выполняющих задачи вторичной обработки радиолокационной информации, на рис. 3 изображены устройства, которые осуществляют пространственно-временную обработку принятого сигнала: антенна, радиоприемное устройство, устройство временной обработки сигнала и устройство обнаружения и разового оценивания. Эти устройства не входят в состав устройства траекторной обработки, но обеспечивают его результатами, полученными на этапе первичной обработки.

В устройстве обнаружения и разового оценивания координат формируются разовые оценки векторов наблюдаемых параметров сигналов  $\theta_{k+1}^i (i = \overline{1, M})$  (отметки) при условии их обнаружения, которые подаются на вход устройства вторичной обработки.

Решение о возможном соответствии каждой из пришедших на данном обзоре отметки той или иной сопровождаемой траектории принимается в устройстве отождествления. Все отметки, которые не отождествились ни с одной из сопровождаемых траекторий, подаются на вход устройства создания новых траекторий.

В данном устройстве происходит инициализация траекторий по отметкам, которые не отождествляются ни с одной из траекторий на этапе отождествления. Такая процедура позволяет, с одной стороны, снизить риск пропуска новых траекторий целей, входящих в зону обзора РСБН, с другой – повысить вероятность обнаружения ложной траектории по ложному срабатыванию обнаружителя первичной обработки РСБН. При этом каждой новой траектории присваивается уникальный, никогда не повторяющийся за все время существования устройства вторичной обработки номер.

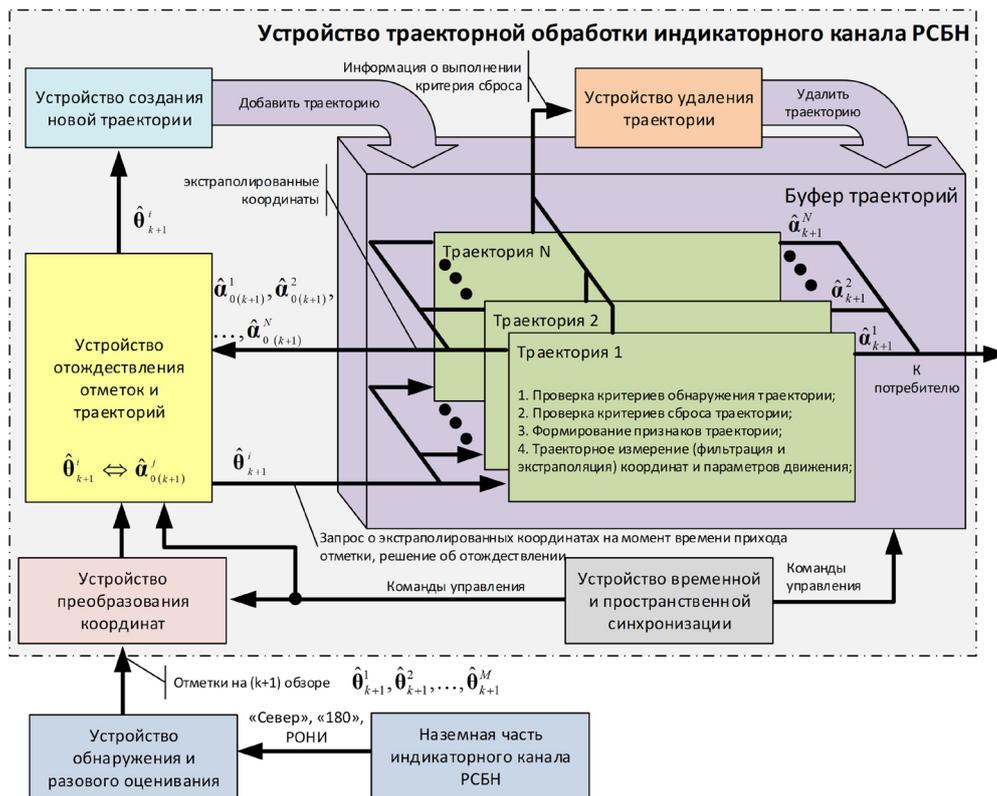


Рис. 3. Обобщенная структура устройства траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации

Fig. 3. Generalized structure of the trajectory processing device for the indicator channel of the short-range radio engineering system

Для организации процесса вторичной обработки радионавигационной информации используется устройство синхронизации, которое разбивает контролируемое воздушное пространство на азимутальные сектора. В процессе определения принадлежности отметки к траектории сравниваются заданная траектория и отметки, содержащиеся в том же секторе, а также двух смежных секторах. Траектории обрабатываются по секторам с учетом скорости сканирования антенны.

Все траектории хранятся в буфере, который обеспечивает хранение данных по всем траекториям и выдачу информации по ним потребителю. Если по траектории перестали поступать отметки, то информация по ней подается на устройство удаления траекторий. Такая ситуация возможна при выходе цели из зоны видимости РСБН по различным причинам.

Процесс обработки одной траектории включает в себя задачи: обнаружения траектории, выделения признаков, сброса (удаления) траектории, траекторное измерение координат и параметров движения целей.

Так как система РСБН работает по принципам вторичной радиолокации (активный запрос – активный ответ), то обнаружение траектории производится по первой отметке, не попавшей ни в один строб траектории. В этом случае вырабатывается команда устройству создания новой траектории «Создать траекторию».

Сброс траектории производится при выполнении бинарного критерия сброса траектории с сопровождения (по количеству  $n$  пропусков подряд), исходя из распределения с разделением по зонам. При выполнении критерия сброса выдается команда «Удалить траекторию» на устройство удаления.

Траекторное измерение координат и параметров движения целей с вероятностным объединением данных (PDA-IMM, JPDA-IMM) заключается в осуществлении фильтрации и экстраполяции координат и параметров движения обнаруженных ЛА (при попадании одной отметки в строб), взвешенном суммировании результатов фильтрации и последующей экстраполяции координат и параметров движения обнаруженных ЛА (при попадании нескольких отметок в строб [5, 6].

Работа траекторного измерителя координат и параметров движения ЛА с вероятностным объединением данных основывается:

на учете возможных моделей движения сопровождаемых целей в отдельных неадаптивных траекторных измерителях, построенных по калмановскому типу [8–10];

на учете оценок, работающих параллельно неадаптивных траекторных измерителей, настроенных на различные модели движения, в адаптивном траекторном измерителе [4, 5, 10];

на организации процесса оценивания вектора состояния цели путем использования всех отметок, отобранных в строб на текущем обзоре в траекторных измерителях координат и параметров движения целей с вероятностным объединением данных [11].

В рамках рассматриваемого в настоящей работе исследования изучался неадаптивный траекторный измеритель калмановского типа, настроенный на одну модель движения. Ранее было установлено, что для устранения эффекта «кажущихся ускорений» сопровождение ЛА по данным индикаторного канала целесообразно производить в прямоугольной системе координат [3]. Для этого нами предложено использовать фильтр Калмана при наблюдении прямоугольных координат с учетом взаимной корреляции ошибок наблюдения, оценка вектора состояния в котором формируется по результатам наблюдения разовых оценок прямоугольных координат [8]. Для проверки эффективности предлагаемого устройства траекторной обработки радионавигационной информации было проведено математическое моделирование.

**Математическое моделирование.** Методика оценки эффективности разработанного устройства траекторной обработки радионавигационной информации включала в себя этапы: определение показателей качества; разработка комплекса математического моделирования для анализа выбранных показателей качества; определение условий моделирования; математическое моделирование и сопоставительный анализ.

Используемые показатели качества – СКО суммарной ошибки измерения азимута  $\Delta_{\Sigma\beta}(k)$ , наклонной дальности  $\Delta_{\Sigma r}(k)$  и местоположения  $\Delta_{\Sigma}(k)$  ЛА [4, 5] – рассчитывались по следующим формулам:

$$\Delta_{\Sigma\beta}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{exp}} - 1} \sum_{j=1}^{N_{\text{exp}}} ([\beta_{Tj}(k) - \beta_{\text{est}j}(k)]^2)}, \quad \Delta_{\Sigma r}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{exp}} - 1} \sum_{j=1}^{N_{\text{exp}}} ([r_{Tj}(k) - r_{\text{est}j}(k)]^2)},$$

$$\Delta_{\Sigma}(k) = \sqrt{\frac{1}{N_{\text{exp}} - 1} \sum_{j=1}^{N_{\text{exp}}} ([x_{Tj}(k) - x_{\text{est}j}(k)]^2 + [z_{Tj}(k) - z_{\text{est}j}(k)]^2)},$$

где  $N_{\text{exp}}$  – количество проведенных опытов (под одним опытом понимается результат фильтрации траектории в течение 500 интервалов обновления данных);  $j$  – номер опыта;  $\beta_{Tj}(k)$ ,  $r_{Tj}(k)$ ,  $x_{Tj}(k)$ ,  $z_{Tj}(k)$  – истинные значения азимута, наклонной дальности и прямоугольных координат ЛА;  $k$  – номер шага наблюдения;  $\beta_{\text{est}j}(k)$ ,  $r_{\text{est}j}(k)$ ,  $x_{\text{est}j}(k)$ ,  $z_{\text{est}j}(k)$  – оцениваемые (первичные либо по результатам фильтрации) значения азимута, наклонной дальности и прямоугольных координат ЛА.

В ходе моделирования каждого модельного эксперимента результаты усреднялись по 5000 опытным реализациям. Для проведения сопоставительного моделирования ошибок измерений был разработан комплекс математического моделирования, позволяющий сформировать входное воздействие в виде суммы задающего и возмущающего воздействий. *Задающее* воздействие представлено детерминированной полиномиальной моделью 1-го порядка и моделью случайного ускорения в виде некоррелированного гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и СКО случайного дискретного маневра  $\sigma_M$ , равным  $0,001 \text{ м/с}^2$ . *Возмущающее* воздействие соответствовало ошибкам первичных измерений в индикаторном канале радиотехнической системы ближней навигации РСБН-4Н с периодом обзора  $0,66 \text{ с}$ .

Траектория была проложена перпендикулярно линии визирования (начальные значения курса  $\alpha$  и азимута  $\beta$  равнялись  $45^\circ$  и  $135^\circ$  соответственно). Начальные значения радиальной дальности для различных модельных экспериментов составляли: 25 км (эксперимент № 1, высота полета 100 м), 50 км (эксперимент № 2, высота полета 500 м), 100 км (эксперимент № 3, высота полета 1000 м) и 200 км (эксперимент № 4, высота полета 5000 м). Скорость летательного аппарата во всех экспериментах являлась постоянной и равнялась  $720 \text{ км/ч}$ . Полученные значения показателей качества приведены на рис. 4–7.

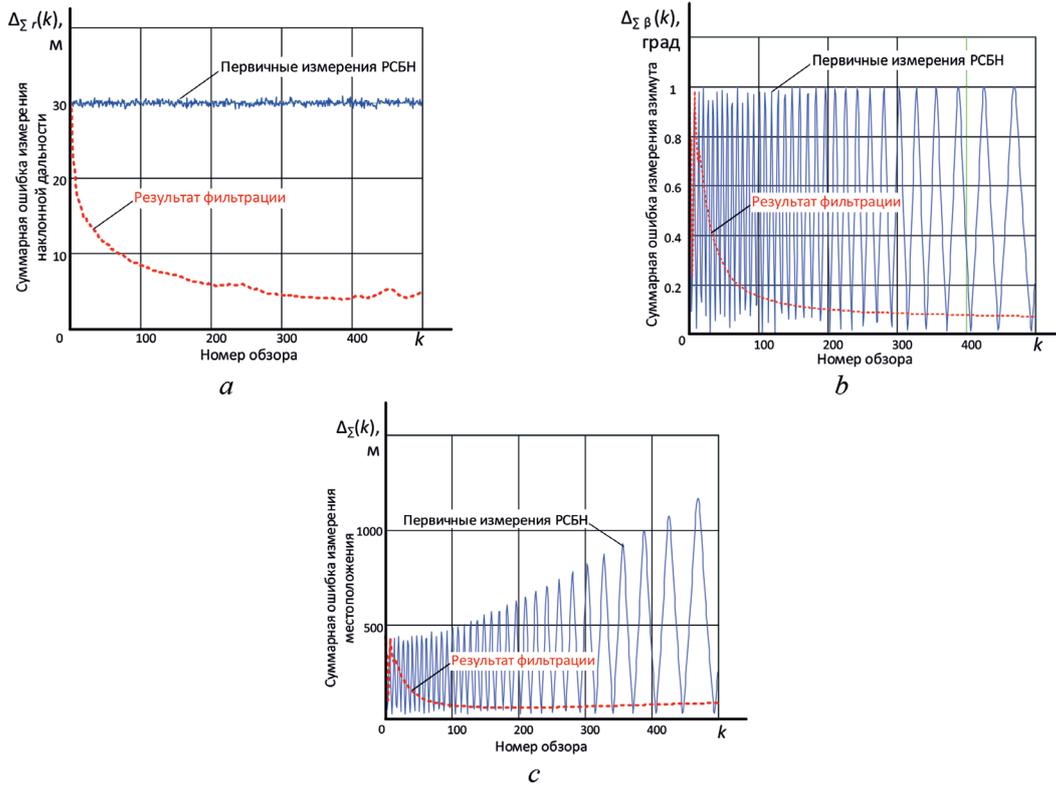


Рис. 4. Результаты модельного эксперимента № 1 (высота полета 100 м):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$   
 Fig. 4. Results of simulation experiment no. 1 (flight altitude 100 m):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$

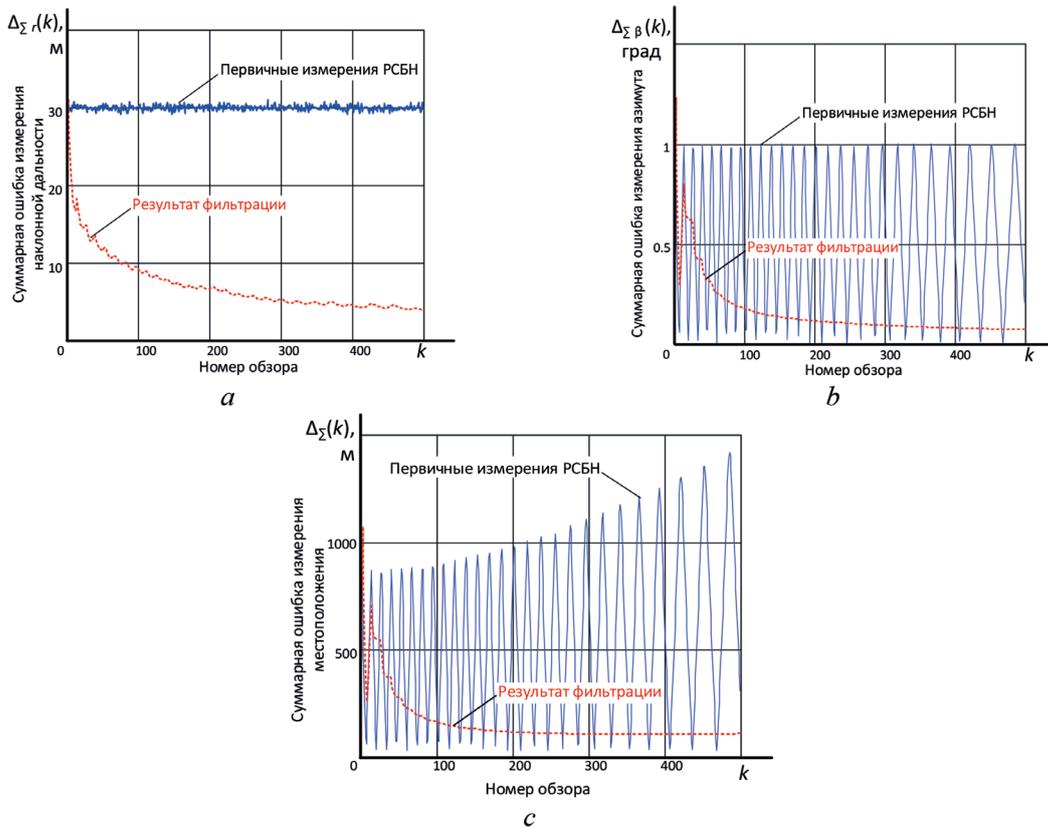
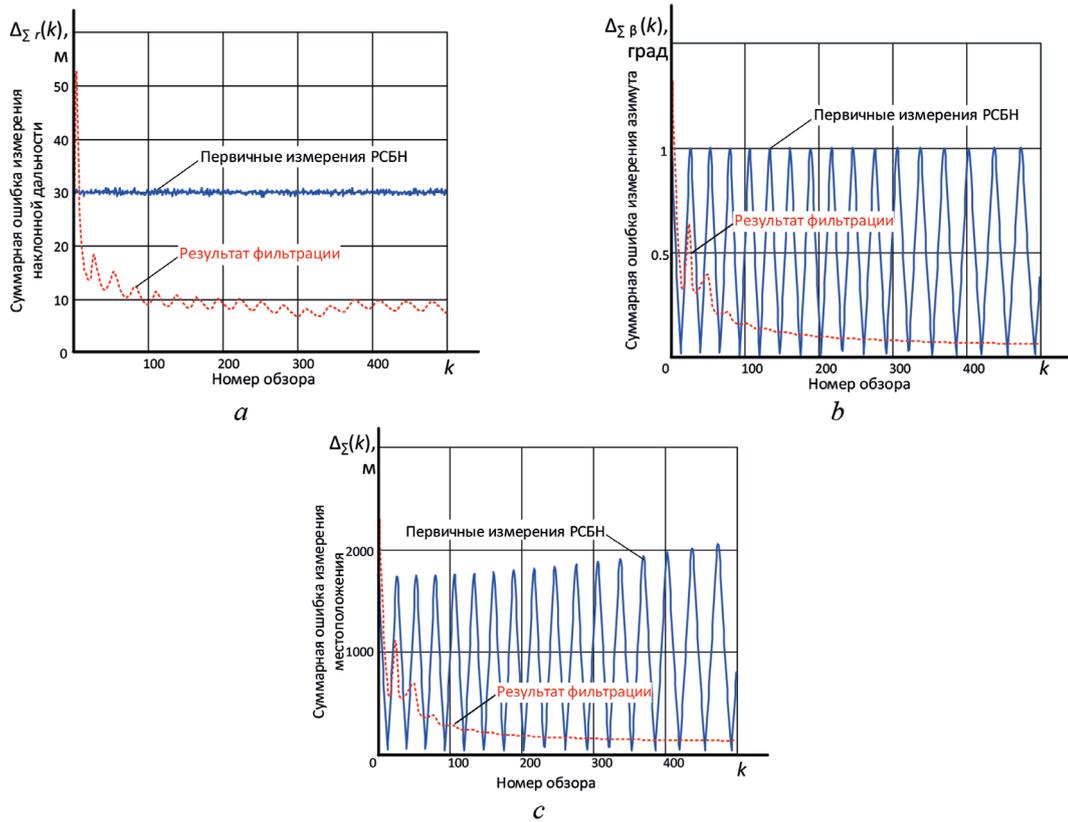
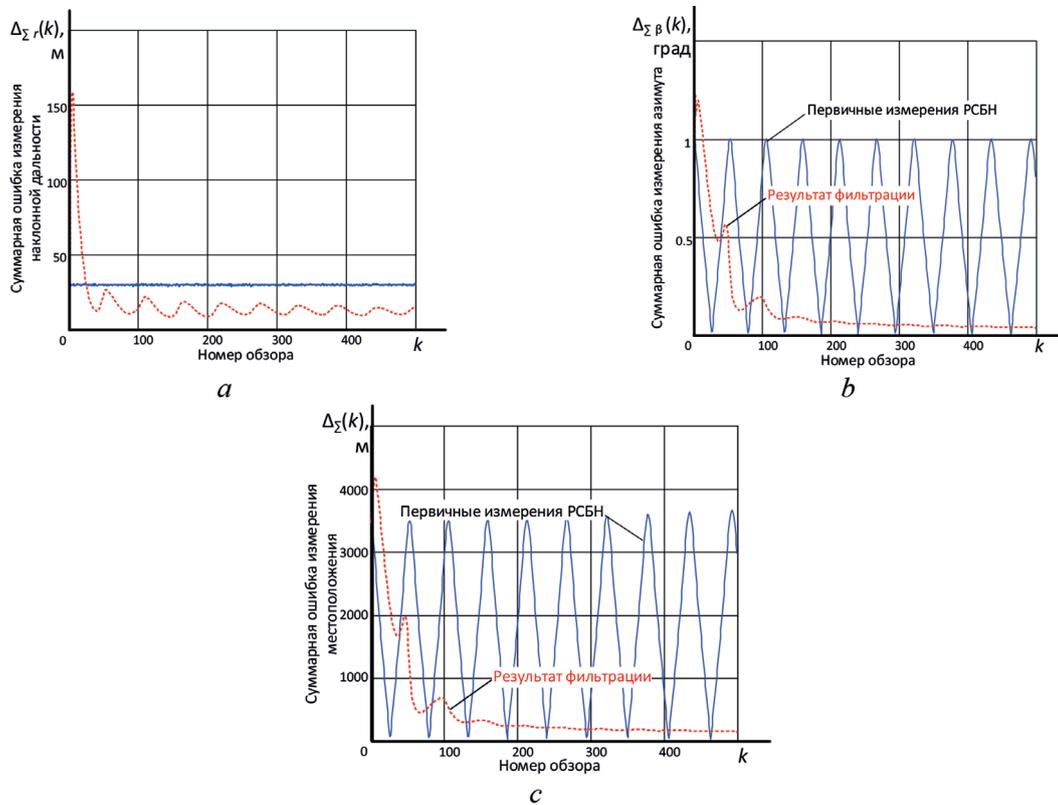


Рис. 5. Результаты модельного эксперимента № 2 (высота полета 500 м):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$   
 Fig. 5. Results of simulation experiment no. 2 (flight altitude 500 m):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$

Рис. 6. Результаты модельного эксперимента № 3 (высота полета 1000 м):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$ Fig. 6. Results of simulation experiment no. 3 (flight altitude 1000 m):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$ Рис. 7. Результаты модельного эксперимента № 4 (высота полета 5000 м):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$ Fig. 7. Results of simulation experiment no. 4 (flight altitude 5000 m):  $a - \Delta_{\Sigma r}(k)$ ,  $b - \Delta_{\Sigma \beta}(k)$ ,  $c - \Delta_{\Sigma}(k)$

Анализ результатов моделирования (см. рис. 4–7) показывает следующее:

1) использование автоматического разового оценивания в индикаторном канале РСБН позволяет существенно повысить точность измерения навигационных параметров (наклонной дальности и азимута) ЛА;

2) наибольший вклад в значение суммарной ошибки разового оценивания местоположения ЛА в индикаторном канале вносит ошибка измерения азимута, она может достигать от 500 до 4000 м в зависимости от условий наблюдения;

3) использование предлагаемого траекторного измерителя в составе устройства траекторной обработки позволяет повысить точность первичного разового оценивания в среднем в 3–5 раз в зависимости от условий наблюдения;

4) с увеличением дальности до ЛА наблюдается ухудшения качества фильтрации (особенно на начальных шагах), что связано с увеличением влияния скачкообразных измерений оценок азимута ЛА и подтверждается исследованиями, изложенными в [5, 10].

**Заключение.** Радиотехнические системы ближней навигации играют важную роль в радиотехническом обеспечении полетов авиации и предназначены для определения навигационных параметров, характеризующих положение летательного аппарата в полярной системе координат (наклонная дальность и азимут). Навигационные параметры определяются как на борту ЛА (при помощи азимутального и дальномерного каналов РСБН), так и на земле (при помощи индикаторного канала РСБН). Существенным недостатком существующих индикаторных каналов является более низкая точность определения навигационных параметров (азимута и наклонной дальности летательного аппарата) по сравнению с бортовой аппаратурой.

В настоящей работе предложен способ повышения точности измерения навигационных параметров ЛА в индикаторном канале – использование траекторной обработки радионавигационной информации. Применение данного подхода позволяет оценивать параметры движения ЛА, находящегося в зоне наблюдения РСБН, на основе измерений его мгновенного положения для определения траектории на интервале измерений и прогнозирования его последующего движения. Структура предлагаемого устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в значительной мере повторяет структуры аналогичных устройств, используемых при обработке радиолокационной информации с учетом особенностей работы индикаторного канала. Предлагаемое устройство траекторной обработки индикаторного канала включает в себя следующие устройства: преобразования координат, отождествления отметок и траекторий, создания новой траектории, удаления траектории, а также буфер траекторий. Разработанное устройство траекторной обработки позволяет оценивать координаты и параметры движения наблюдаемых ЛА, оборудованных бортовой аппаратурой РСБН, выдавать им признак траектории (скоростной или малоскоростной ЛА, «Включено опознавание» и т. д.).

Направлениями дальнейших исследований можно считать: разработку методов нелинейной дискретной фильтрации координат и параметров движения, учитывающей скачкообразные измерения оценок азимута ЛА; разработку модели входного воздействия для индикаторного канала РСБН с учетом аномальных разовых оценок ЛА, обусловленных существованием внутрисистемных синхронных и несинхронных помех; исследование показателей качества устройства траекторной обработки индикаторного канала РСБН в условиях многоцелевой обстановки (в том числе в случае наблюдения маневрирующих и (или) групповых целей).

### Благодарности

Исследования построения обобщенной структуры устройства траекторной обработки для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации, приведенные в данной работе, выполнены при поддержке гранта Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект № T21-071).

### Acknowledgements

Research on the construction of a generalized structure of a trajectory processing device for the indicator channel of a short-range radio engineering system, presented in this work, was carried out with the support of a grant from the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project no. T21-071).

## Список использованных источников

1. Иванюк, В. С. Всенаправленный азимутально-дальномерный радиомаяк РСБН-4 / В. С. Иванюк, А. С. Ткаченко, П. А. Хмарский. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2021. – 325 с.
2. Бакулев, П. А. Радионавигационные системы / П. А. Бакулев. – Изд. 2-е, испр. и доп. – М.: Радиотехника, 2011. – 272 с.
3. Хмарский, П. А. Траекторный измеритель для индикаторного канала радиотехнической системы ближней навигации / П. А. Хмарский, А. Е. Бондаренко, А. С. Горбатко // Навигация и управление движением: материалы XXI конф. молодых ученых (XXI КМУ 2019), г. Санкт-Петербург, 19–22 марта 2019 г. / науч. ред. О. А. Степанов; под общ. ред. В. Г. Пешехонова. – СПб.: ГИЦ РФ АО «ЦНИИ «Электроприбор», 2019. – С. 300–302.
4. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория / под ред. Я. Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 510 с.
5. Bar-Shalom, Y. Estimation with Applications to Tracking and Navigation / Y. Bar-Shalom, X.-Rong Li, T. Kirubarajan. – New York: A Wiley-Interscience Publication, 2001. – 558 p. <https://doi.org/10.1002/0471221279>
6. Solonar, A. S. Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking / A. S. Solonar, P. A. Khmarski // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1864. – Art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>
7. Solonar, A. S. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source / A. S. Solonar, P. A. Khmarski // J. Phys.: Conf. Ser. – 2021. – Vol. 1864. – Art. ID 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>
8. Li, X. R. Survey of maneuvering target tracking. Part III: Measurement models / X. R. Li, V. P. Jilkov // International Symposium on Optical Science and Technology: SPIE Proceedings. – San Diego, CA, United States, 2001. – Vol. 4473: Signal and Data Processing of Small Targets. – P. 423–446. <https://doi.org/10.1117/12.492752>
9. Zhao, Z. L. Best linear unbiased filtering with nonlinear measurements for target tracking / Z. L. Zhao, X. R. Li, V. P. Jilkov // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2004. – Vol. 40, № 4. – P. 1324–1336. <https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1386884>
10. Li, X. R. Survey of maneuvering target tracking. Part V: Multiple-model methods / X. R. Li, V. P. Jilkov // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. – 2005. – Vol. 41, № 4. – P. 1255–1321. <https://doi.org/10.1109/TAES.2005.1561886>
11. Artemiev, V. M. Detection of signals of moving objects based on the time selection method / V. M. Artemiev, S. M. Kostromitsky, A. O. Naumov // Proc. of the National Acad. of Sci. of Belarus. Phys.-techn. ser. – 2021. – Vol. 66, № 3. – P. 335–342. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-335-342>

## References

1. Ivanyuk V. S., Tkachenko A. S., Khmarski P. A. *Omnidirectional Azimuth-Range-finder Radio Beacon RSBN-4*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus, 2021. 325 p. (in Russian).
2. Bakulev P. A. *Radio Navigation Systems*. 2<sup>nd</sup> ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2011. 272 p. (in Russian).
3. Khmarski P. A., Bondarenko A. E., Gorbatko A. S. Trajectory meter for the indicator channel of the short-range navigation radio system. *Navigatsiya i upravlenie dvizheniem: materialy XXI konferentsii molodykh uchenykh (XXI KMU 2019), g. Sankt-Peterburg, 19–22 marta 2019 g.* [Navigation and Traffic Control: Materials of the 21<sup>st</sup> Conference of Young Scientists (21<sup>st</sup> CYS 2019), St. Petersburg, March 19–22, 2019]. St. Petersburg, Concern CSRI Elektropribor, JSC, 2019, pp. 300–302 (in Russian).
4. Shirman Ya. D. (ed.). *Radio-Electronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 510 p. (in Russian).
5. Bar-Shalom Y., Li X.-Rong, Kirubarajan T. *Estimation with Applications to Tracking and Navigation*. New York, A Wiley-Interscience Publication, 2001. 558 p. <https://doi.org/10.1002/0471221279>
6. Solonar A. S., Khmarski P. A. Main problems of trajectory processing and approaches to their solution within the framework of multitarget tracking. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1864, art. ID 012004. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012004>
7. Solonar A. S., Khmarski P. A. General construction principles and performance features of trajectory processing by data from one radar data source. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, vol. 1864, art. ID 012138. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1864/1/012138>
8. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of maneuvering target tracking. Part III: Measurement models. *International Symposium on Optical Science and Technology: SPIE Proceedings*. San Diego, CA, United States, 2001, vol. 4473, 423–446. <https://doi.org/10.1117/12.492752>
9. Zhao Z. L., Li X. R., Jilkov V. P. Best linear unbiased filtering with nonlinear measurements for target tracking. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 1324–1336. <https://doi.org/10.1109/TAES.2004.1386884>
10. Li X. R., Jilkov V. P. Survey of maneuvering target tracking. Part V: Multiple-model methods. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2005, vol. 41, no. 4, pp. 1255–1321. <https://doi.org/10.1109/TAES.2005.1561886>
11. Artemiev V. M., Kostromitsky S. M., Naumov A. O. Detection of signals of moving objects based on the time selection method. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 335–342. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-335-342>

**Информация об авторах**

*Хмарский Петр Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

*Солонар Андрей Сергеевич* – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры автоматизации, радиолокации и приема-передающих устройств, Военная академия Республики Беларусь (пр. Независимости, 220, 220057, Минск, Республика Беларусь). E-mail: andssnew@yandex.ru

*Наумов Александр Олегович* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией радиотомографии, Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 16, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: naumov@iaph.bas-net.by

**Information about the authors**

*Petr A. Khmarski* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-3404-3917>. E-mail: pierre2009@mail.ru

*Andrei S. Solonar* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Automation, Radar and Transceiver Devices, Military Academy of the Republic of Belarus (220, Nezavisimosti Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: andssnew@yandex.ru

*Alexander O. Naumov* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Radiotomography Laboratory, Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus (16, Akademicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-4624-9261>. E-mail: naumov@iaph.bas-net.by

## **ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**

### **DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS**

УДК 621.039.743

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-72-81>

Поступила в редакцию 09.06.2022

Received 09.06.2022

**Н. В. Горбачева, Ю. А. Корчева, Н. Д. Кузьмина, Н. В. Кулич, С. Н. Яцко**

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук  
Беларуси, Прилесье, Минский район, Минская область, Республика Беларусь*

### **РАНЖИРОВАНИЕ ДОЛГОЖИВУЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ ЯДЕРНОГО ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА БЕЛОРУССКОЙ АЭС ПО ВКЛАДАМ В ПОТЕНЦИАЛЬНУЮ БИОЛОГИЧЕСКУЮ ОПАСНОСТЬ**

**Аннотация.** С использованием методического подхода оценки потенциальной биологической опасности (радиотоксичности) радионуклидов проведены расчетные исследования и сравнительный анализ вкладов в суммарную радиотоксичность долгоживущих продуктов деления и актинидов, накапливающихся в ядерном топливном цикле (ЯТЦ) Белорусской АЭС. Для корректной оценки массы изотопа  $^{237}\text{Np}$  на долговременном этапе обращения с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) проведена доработка математической модели ЯТЦ Белорусской АЭС расчетного кода CUB в части учета последовательных превращений изотопов  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$ . Начальные концентрации по основным радиационно-опасным радионуклидам на момент выгрузки топлива из активной зоны реактора ВВЭР-1200 представлены в разработанной авторами и оформленной в виде электронного справочника «Радиационные характеристики отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС» базе данных. Подготовка баз данных ведется согласно рекомендациям Руководства по безопасности РБ-093-20 «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных». Основные характеристики, используемые при моделировании ЯТЦ в коде CUB: общая масса ОЯТ (2492 т), количество отработавших тепловыделяющих сборок (5294 шт.) и среднее выгорание, – приняты в соответствии с данными Стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС. Показано, что на этапе до 100 лет основной вклад в суммарную радиотоксичность вносят актиниды  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , при этом вклады  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  равны 0,07, 49,0 и 0,007 % соответственно. Через 5 тыс. лет вклад  $^{241}\text{Am}$  составит 0,24 %, а изотопа  $^{237}\text{Np}$  – до 0,1 % от общего вклада актинидов в суммарную радиотоксичность. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования требований к фракционированию (извлечению  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) при переработке ОЯТ Белорусской АЭС.

**Ключевые слова:** Белорусская атомная электростанция, водо-водяной энергетический реактор, переработка, отработавшее ядерное топливо, радиотоксичность, ядерный топливный цикл, радиационная безопасность, актиниды, продукты деления, математическая модель

**Для цитирования:** Ранжирование долгоживущих радионуклидов ядерного топливного цикла Белорусской АЭС по вкладам в потенциальную биологическую опасность / Н. В. Горбачева [и др.] // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 72–81. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-72-81>

**Natalia V. Harbachova, Julia. A. Korchova, Natalia D. Kuzmina, Nikolai V. Kulich, Svetlana N. Yacko**

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

### **THE LONG-LIVED RADIONUCLIDES RADIOTOXICITY RANKING THE NUCLEAR FUEL CYCLE OF THE BELARUSIAN NPP**

**Abstract.** Using a methodical approach to the potential biological hazard (radiotoxicity) assessment of radionuclides, computational studies and a comparative analysis of the contributions to the total radiotoxicity of long-lived fission products and actinides accumulated in the nuclear fuel cycle of the Belarusian NPP were carried out. In order to estimate correctly

the  $^{237}\text{Np}$  isotope mass at the long-term stage of SNF management, the mathematical model of the nuclear fuel cycle of the Belarusian NPP of the code CUB was modified to take into account the transmutation chain of  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  and  $^{237}\text{Np}$  isotopes. The initial concentrations for the main radiation-hazardous radionuclides at the time of fuel unloading from the VVER-1200 reactor core are presented in the database “Radiation Characteristics of Spent Nuclear Fuel of the Belarusian NPP” developed by the authors. The database development is carried out in accordance with the recommendations of the RB-093-20 “Radiation and thermophysical characteristics of spent nuclear fuel of pressurized water power reactors and high-power channel reactors”. The main characteristics used in the nuclear fuel cycle simulation in the CUB code, such as the total mass of spent nuclear fuel (2492 tons), the number of spent fuel assemblies (5294) and the average burnup, are taken in accordance with the Spent Fuel Management Strategy of the Belarusian NPP data. It is shown that at the stage up to 100 years, the main contributors to the total radiotoxicity are the isotopes of  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ , where contributions of three last of them are 0.07, 49.0 and 0.007%, respectively. But 5000 years later, the contribution of  $^{241}\text{Am}$  will be 0.24%, and the isotope  $^{237}\text{Np}$  – up to 0.1% of the total actinides radiotoxicity. The results obtained can be used to substantiate for the recovery degree requirements of  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  during the SNF of the Belarusian NPP reprocessing.

**Keywords:** Belarusian nuclear power plant, water-water power reactor, reprocessing, spent nuclear fuel, radiotoxicity, nuclear fuel cycle, radiation safety, actinides, fission products, mathematical model

**For citation:** Harbachova N. V., Korchova Ju. A., Kuzmina N. D., Kulich N. V., Yacko S. N. The long-lived radionuclides radiotoxicity ranking the nuclear fuel cycle of the Belarusian NPP. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 72–81 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-72-81>

**Введение.** В настоящее время в Республике Беларусь введен в эксплуатацию первый энергоблок Белорусской АЭС с реактором типа ВВЭР-1200, ввод второго энергоблока запланирован на 2023 год. Одной из составляющих ядерной и радиационной безопасности на всех этапах жизненного цикла атомной электростанции является безопасность при обращении с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ). Государственная политика Республики Беларусь в области обращения с ОЯТ подчинена реализации оптимальной с технологической точки зрения, экономически целесообразной, экологически и социально безопасной Стратегии обращения с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС (далее – Стратегия), утвержденной постановлением Совета Министров Республики Беларусь 22.08.2019, № 558. Так, после выгрузки топлива из активных зон реакторов и обязательной выдержки в приреакторных бассейнах выдержки (сроком до 10 лет) для уменьшения радиоактивности и снижения остаточного тепловыделения Стратегией предусматриваются следующие этапы: промежуточное (включая технологическое) хранение ОЯТ, передача на переработку и переработка ОЯТ на предприятиях Российской Федерации, долговременное обращение с продуктами переработки ОЯТ.

Следует отметить, что возврат высокоактивных радиоактивных отходов (далее – ВАО) продуктов переработки ОЯТ в страну происхождения топлива является общепринятой практикой. В соответствии со Стратегией предпочтительным вариантом является переработка ОЯТ с исключением долгоживущих радионуклидов – изотопов U, Pu, Np. Возврату в Республику Беларусь подлежат радиоактивные отходы, включенные в стеклоподобную матрицу и содержащие сравнительно короткоживущие изотопы щелочно-земельных элементов  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  (так называемую цезиево-стронциевую фракцию).

Объективную количественную основу для оценки долговременной безопасности систем по обращению с ОЯТ и расчетов экономических затрат на обращение с ним при реализации вариантов Стратегии можно получить на основе прогнозных оценок запасов высокотоксичных актинидов и долгоживущих продуктов деления, входящих в состав ОЯТ. На период времени до 10 тыс. лет, сопоставимый с периодами полураспадов долгоживущих актинидов, в современной международной практике оценки безопасности систем обращения с ОЯТ в качестве индикаторов безопасности используются допустимые санитарными нормами концентрации радиотоксичных элементов в биосферной воде.

Авторами ранее были выполнены расчетные исследования и получены прогнозные оценки радиационных характеристик продуктов деления и актинидов, образовавшихся в ядерном топливном цикле (ЯТЦ) Белорусской АЭС на промежуточном и долговременном этапах обращения с ОЯТ [1–3]. Предварительный анализ показал, что  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  – одни из тех актинидов, которые накапливаются в ОЯТ ВВЭР-1200 в наибольшем количестве. В связи с этим можно ожидать, что их высокая природная радиотоксичность будет обуславливать значительный вклад

в потенциальную биологическую опасность всего ОЯТ, что следует принимать во внимание при определении требований к степени извлечения изотопов U, Pu, Np при его переработке.

*Цель настоящей работы* – проведение расчетных исследований и сравнительного анализа по потенциальной биологической опасности долгоживущих продуктов деления и актинидов, накапливающихся в ЯТЦ Белорусской АЭС, с учетом дополнительного образования на этапе долговременного обращения изотопа  $^{237}\text{Np}$  при распаде его материнского ядра  $^{241}\text{Am}$ .

**Исходные данные и нормативная база.** На основании сведений, представленных в Руководстве по безопасности РБ-093-20 «Радиационные и теплофизические характеристики отработавшего ядерного топлива водо-водяных энергетических реакторов и реакторов большой мощности канальных» (далее – РБ-093-20), авторами ведется разработка баз данных по радиационным характеристикам (концентрации и удельные активности) основных радиационно-опасных продуктов деления и актинидов в топливе отработавших тепловыделяющих сборок (далее – ОТВС) реактора ВВЭР-1200. Разрабатываемая база данных оформлена в виде справочного инструмента (Электронный справочник) «Радиационные характеристики отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС». Перечень основных радиационно-опасных радионуклидов предусматривает учет 49 изотопов продуктов деления и актинидов, включая изотопы  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ . Справочные данные содержат рассчитанные начальные концентрации и удельные активности радионуклидов для различных типов топлива, отличающихся начальным обогащением по  $^{235}\text{U}$  (3,53, 4,40, 4,81 %) в диапазоне от 2 ГВт·сут/кг U до проектной глубины выгорания топлива каждого типа. Продолжается работа по расширению базы данных на перспективные для Белорусской АЭС типы топлива, в частности на топливо с начальным обогащением 4,95 % по  $^{235}\text{U}$ .

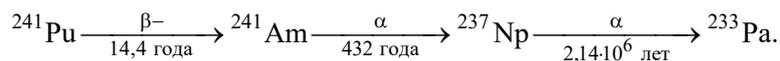
Характеристики ЯТЦ Белорусской АЭС приняты на основании сведений Стратегии, согласно которой на Белорусской АЭС будет реализован четырехгодичный топливный цикл с перегрузкой один раз в 12 месяцев, так что количество ОТВС, выгруженных из двух энергоблоков Белорусской АЭС за 60 лет эксплуатации, составит 5294 ед. с массой 2492 т тяжелого металла ( $\text{UO}_2$ ) при средней глубине выгорания топлива 55,6 МВт·сут/т U.

**Методика анализа и математические модели.** Решение проблемы безопасности ВАО, подлежащих окончательному захоронению, требует расчетного обоснования с использованием радиоэкологических подходов и методов. Такие оценки послужат основой разработки требований к составу и активности захораниваемых радионуклидов.

В качестве методического подхода использована концепция оценки и сравнительного анализа потенциальной биологической опасности (радиотоксичности) радионуклидов, входящих в состав ОЯТ Белорусской АЭС [4, 5].

С целью определения запасов активностей и оценки характеристик радиотоксичности на промежуточном и долговременном этапах обращения с ОЯТ и ВАО, предусмотренных Стратегией, разработана модель формирования запасов радиоактивности ЯТЦ Белорусской АЭС [6].

Для корректной оценки концентраций и активностей продуктов деления и актинидов, накапливающихся в ЯТЦ на этапах промежуточного и долговременного обращения, РБ-093-20 регламентируется учет последовательных взаимосвязанных превращений  $^{241}\text{Pu}$  (период полураспада 14,4 года),  $^{241}\text{Am}$  (период полураспада 432 года) и  $^{237}\text{Np}$  (период полураспада  $2,14 \cdot 10^6$  лет) в ОЯТ в соответствии со схемой радиоактивных превращений:



Чтобы выявить наиболее значимые вкладчики в потенциальную биологическую опасность ОЯТ Белорусской АЭС на промежуточном и долговременном этапах обращения, проведена модификация модели формирования запасов радиоактивности в ОЯТ в части учета взаимосвязанных превращений  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  согласно РБ-093-20.

Дополнительная масса  $^{237}\text{Np}$ , которая образуется за счет распадов предшественников в момент времени  $t$  на этапах промежуточного и долговременного обращения с ОЯТ, определяется на основании следующих уравнений для концентраций  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ :

$$y_{237\text{Np}}(t) = y_{241\text{Am}}(0) \cdot \frac{A_{241\text{Am}}}{A_{241\text{Pu}}} \cdot \frac{\lambda_{241\text{Pu}}}{\lambda_{241\text{Am}} - \lambda_{241\text{Pu}}} \left[ \exp(-\lambda_{241\text{Pu}} t) - \exp(-\lambda_{241\text{Am}} t) \right] + y_{241\text{Pu}}(0) \cdot \frac{A_{237\text{Np}}}{A_{241\text{Pu}}} \times$$

$$\times \lambda_{241\text{Pu}} \lambda_{241\text{Am}} \left[ \frac{\exp(-\lambda_{241\text{Pu}} t)}{(\lambda_{241\text{Am}} - \lambda_{241\text{Pu}})(\lambda_{237\text{Np}} - \lambda_{241\text{Pu}})} + \frac{\exp(-\lambda_{241\text{Am}} t)}{(\lambda_{241\text{Pu}} - \lambda_{241\text{Am}})(\lambda_{237\text{Np}} - \lambda_{241\text{Am}})} + \right.$$

$$\left. + \frac{\exp(-\lambda_{237\text{Np}} t)}{(\lambda_{241\text{Pu}} - \lambda_{237\text{Np}})(\lambda_{241\text{Am}} - \lambda_{237\text{Np}})} \right], \quad (1)$$

$$y_{241\text{Am}}(t) = y_{241\text{Am}}(0) \cdot \exp(-\lambda_{241\text{Am}} t) + y_{241\text{Pu}}(0) \cdot \frac{A_{241\text{Am}}}{A_{241\text{Pu}}} \times$$

$$\times \frac{\lambda_{241\text{Pu}}}{\lambda_{241\text{Am}} - \lambda_{241\text{Pu}}} \left[ \exp(-\lambda_{241\text{Pu}} t) - \exp(-\lambda_{241\text{Am}} t) \right], \quad (2)$$

$$y_{241\text{Pu}}(t) = y_{241\text{Pu}}(0) \cdot \exp(-\lambda_{241\text{Pu}} t), \quad (3)$$

где  $y_{237\text{Np}}(0)$ ,  $y_{241\text{Pu}}(0)$ ,  $y_{241\text{Am}}(0)$  – начальные концентрации  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в момент времени  $t$  с учетом времени выдержки ОТВС  $t_n$ , равным «возрасту кассеты»,  $\text{г}\cdot\text{т}^{-1}$ ;  $\lambda_{237\text{Np}}$ ,  $\lambda_{241\text{Pu}}$ ,  $\lambda_{241\text{Am}}$  – постоянные распада  $^{237}\text{Np}$  и его предшественников,  $\text{с}^{-1}$ ;  $A_{237\text{Np}}$ ,  $A_{241\text{Pu}}$ ,  $A_{241\text{Am}}$  – атомные массы радионуклидов  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

Зависимости удельных активностей радионуклидов от времени выдержки на промежуточном и долговременном этапах рассчитываются по формуле

$$C_i(t) = \lambda_i \cdot k_i \cdot y_i(t), \quad (4)$$

где  $C_i$  – удельная активность  $i$ -го радионуклида, Бк/г;  $k_i$  – переводной коэффициент для расчета удельной активности (Приложение № 5 к РБ-093-20), Бк/г; индекс  $i$  соответствует радионуклидам  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ .

Модель, описывающая изменения концентраций при радиоактивных превращениях  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$  в соответствии с уравнениями (1)–(4), включена в расчетный код CUB.

Верификация кода CUB проведена с помощью проверочных расчетов баланса масс  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  в трехзвенной цепочке радиоактивных распадов по формулам (1)–(3) и аналитического выражения для максимума концентрации  $^{241}\text{Am}$ . Рассчитанные начальные концентрации  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  для средней глубины выгорания 55,6 МВт·сут/т U, представленные в Электронном справочнике, на момент выгрузки ОТВС из активной зоны реактора ВВЭР-1200 составляют соответственно 1810, 73,4 и 839 г/т  $\text{UO}_2$ . Радиоактивный распад  $^{241}\text{Pu}$  приводит к росту концентрации его дочернего радионуклида  $^{241}\text{Am}$ , за счет чего максимальная концентрация  $^{241}\text{Am}$  достигается через 60 лет от момента извлечения  $n$ -й ОТВС из активной зоны и составляет 1680,0 г/т. Максимальная концентрация  $^{237}\text{Np}$  за счет радиоактивного распада материнского нуклида  $^{241}\text{Am}$  достигается примерно через 5 тыс. лет и составляет 2640,0 г/т  $\text{UO}_2$  (рис. 1).

В соответствии с реализованной в коде CUB моделью (уравнения (1)–(4)) выполнены расчеты динамики удельных активностей  $^{241}\text{Pu}$  и  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  с учетом «возраста» (продолжительности выдержки после извлечения из активной зоны реактора) каждой из 5294 ОТВС. Результаты расчетов представлены на рис. 2.

Анализ показал, что на промежуточном этапе основной вклад в активность вносит  $^{241}\text{Am}$ . После 5 тыс. лет выдержки доминирующий вклад будет вносить  $^{237}\text{Np}$ .

**Расчет характеристик потенциальной биологической опасности (радиотоксичности) отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС.** Радиотоксичность  $i$ -го радионуклида определяет массу воды, которая необходима для разбавления 1 т ядерного топлива с целью снижения активности  $i$ -го радионуклида до референтного уровня. Под указанным уровнем подразумевается

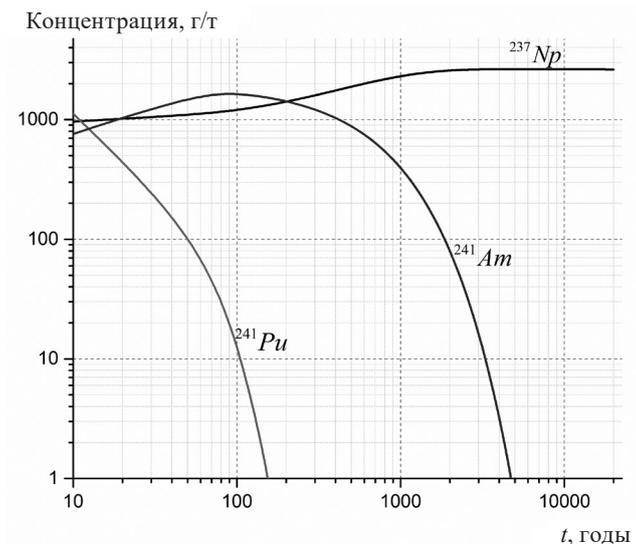


Рис 1. Зависимости концентраций  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  от времени выдержки отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС

Fig. 1.  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  dependencies of concentrations on the exposure time of the spent nuclear fuel of the Belarusian NPP

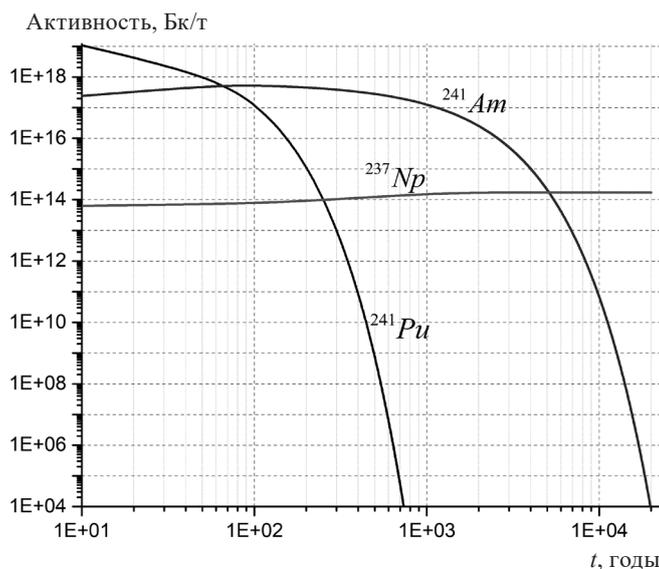


Рис 2. Зависимость удельных активностей  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  от времени выдержки отработавшего ядерного топлива Белорусской АЭС

Fig. 2.  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$  dependencies of specific activities on the exposure time of the spent nuclear fuel of the Belarusian NPP

уровень радиационного фактора, при превышении которого следует проводить определенные защитные мероприятия для населения. Данная величина представлена в Гигиеническом нормативе, утвержденном постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь от 28.12.2012 № 213, и определяется по формуле

$$RT_{\text{вода}}^i = \frac{C_i}{\text{PY}_i}, \quad (5)$$

где  $RT_{\text{вода}}^i$  – радиотоксичность  $i$ -го нуклида по воде, кг/т;  $C_i$  – удельная активность  $i$ -го нуклида в ОЯТ, Бк/т;  $\text{PY}_i$  – референтный уровень содержания  $i$ -го радионуклида в питьевой воде для данного нуклида при поступлении с водой в организм человека, Бк/кг.

**Ранжирование вкладов продуктов деления и актинидов в радиотоксичность на этапах промежуточного и долговременного обращения с отработавшим ядерным топливом.** Первичными данными для расчетов радиотоксичности по воде служат данные по радионуклидному составу и удельной активности ядерного топлива, выгружаемого из реактора ВВЭР-1200, представленные в базе данных Электронного справочника, совместно со значениями референтных уровней содержания радионуклидов в питьевой воде. Значения радиотоксичности актинидов и продуктов деления (по воде) на промежуточном (100 лет) и долговременном (до 10 тыс. лет) этапах обращения рассчитывались кодом CUB с учетом особенностей радиоактивных превращений в двух- либо трехзвенных цепочках радиоактивных превращений, их периодов полураспадов, а также токсических свойств.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости характеристик радиотоксичности продуктов деления и актинидов от времени на этапах промежуточного и долговременного обращения (до 10 тыс. лет).

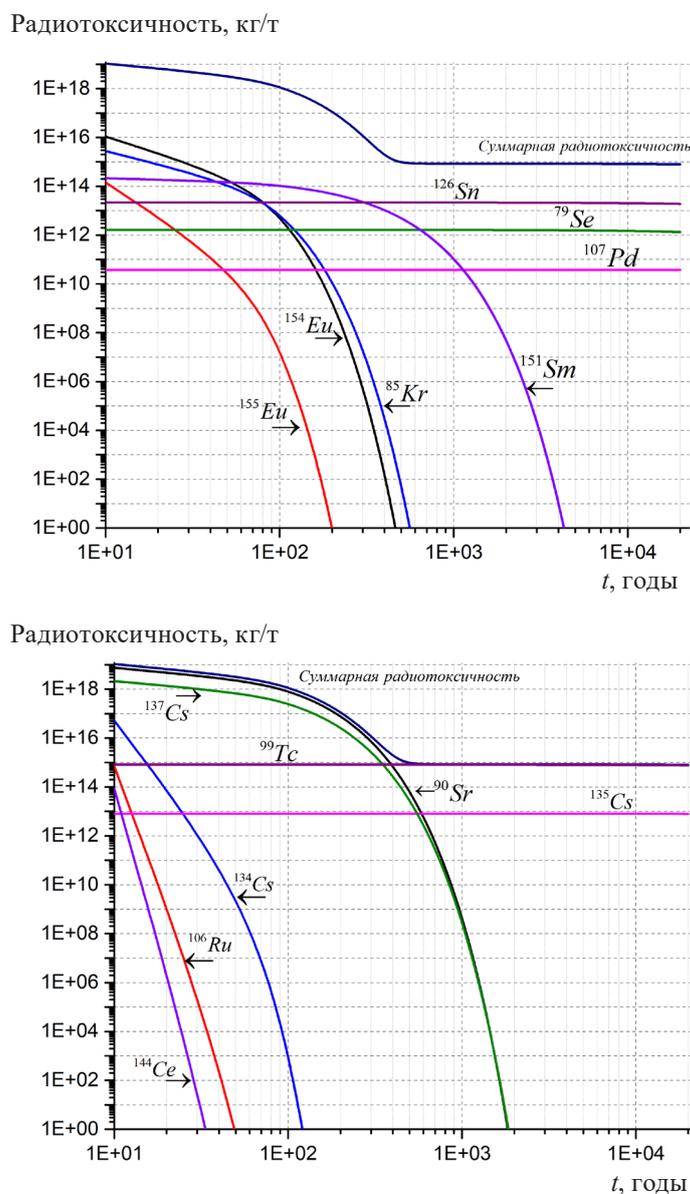


Рис. 3. Радиотоксичность по воде продуктов деления при длительном хранении 1 т отработавшего ядерного топлива реактора ВВЭР-1200 (обогащение по  $^{235}\text{U}$  4,81 %)

Fig. 3. Water radiotoxicity of fission products with long-term storage of 1 t of the spent nuclear fuel of the VVER-1200 reactor (enrichment by  $^{235}\text{U}$  4.81 %)

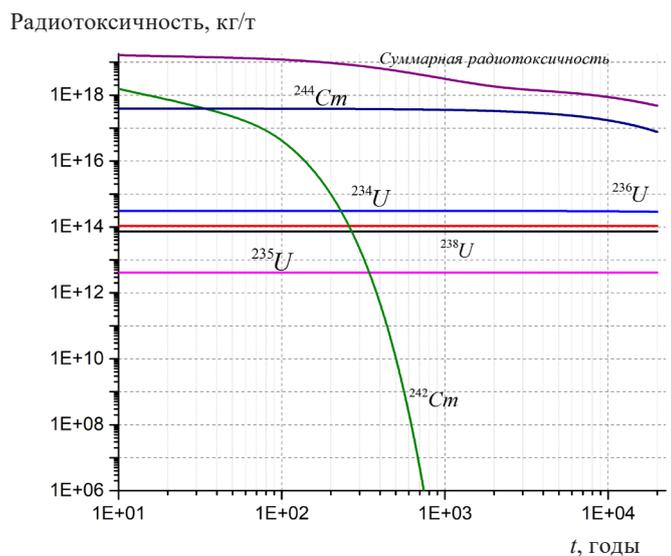
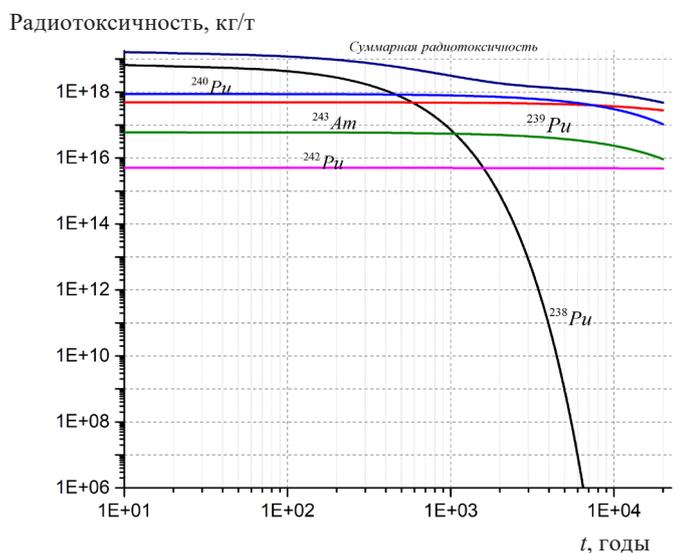
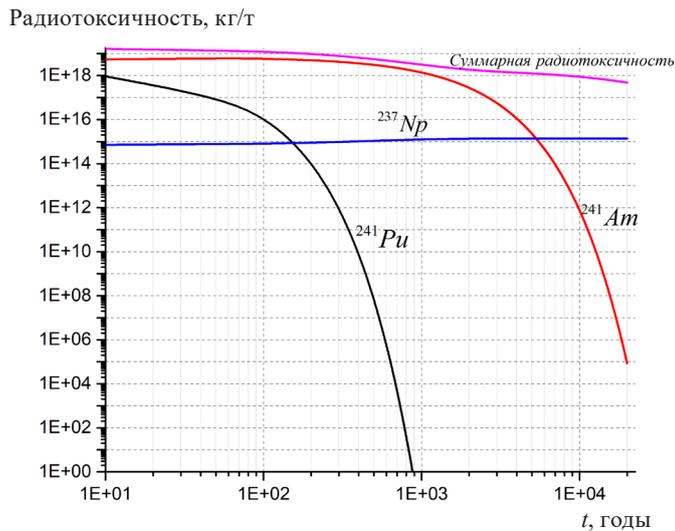


Рис. 4. Радиотоксичность по воде актинидов при длительном хранении 1 т отработавшего ядерного топлива ВВЭР-1200 (обогащение по  $^{235}\text{U}$  4,81 %)

Fig. 4. Water radiotoxicity of actinides with long-term storage of 1 t of the spent nuclear fuel of the VVER-1200 (enrichment by  $^{235}\text{U}$  4.81 %)

Оценка суммарной радиотоксичности ОЯТ показала, что на этапе хранения до 100 лет данная величина обусловлена радионуклидами  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ . При этом суммарная радиотоксичность продуктов деления определяется вкладом  $^{106}\text{Ru}$ ,  $^{144}\text{Ce}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{154}\text{Eu}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ . Радиотоксичность продуктов деления за 100 лет снижается на три порядка – от  $10^{18}$  до  $10^{15}$  кг/т. Преобладающий вклад в суммарную радиотоксичность актинидов на этапе до 100 лет вносят изотопы  $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{243}\text{Am}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{237}\text{Np}$ . Следует отметить, что в течение первых 10 лет хранения ОЯТ вклад  $^{241}\text{Pu}$  составляет 6 % от общего вклада актинидов в суммарную радиотоксичность, вклад  $^{241}\text{Am}$  – 33 %, а  $^{237}\text{Np}$  – 0,005 %. К концу промежуточного этапа обращения с ОЯТ вклады  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  и  $^{237}\text{Np}$  равны 0,07, 49 и 0,007 % соответственно от общего вклада актинидов в суммарную радиотоксичность. При этом суммарная радиотоксичность актинидов по воде снижается на три порядка – от  $10^{19}$  до  $10^{16}$  кг/т.

Что касается  $^{241}\text{Am}$ , то через 5 тыс. лет его вклад в радиотоксичность снижается до 0,24 %, при этом вклад  $^{237}\text{Np}$  возрастет до 0,1 % от общего вклада актинидов в суммарную радиотоксичность. Таким образом, на долговременном этапе обращения вклад  $^{237}\text{Np}$  в общую радиотоксичность увеличивается в 20 раз. В целом на этапе долговременного хранения до 10 тыс. лет вклад актинидов в суммарную радиотоксичность на два порядка превышает вклад продуктов деления.

**Заключение.** С использованием разработанной и реализованной в коде CUB модели проведены расчетные исследования динамики снижения характеристик радиотоксичности долгоживущих радионуклидов в зависимости от времени выдержки на промежуточном и долговременном этапах обращения с ОЯТ и/или ВАО переработки Белорусской АЭС. Модель формирования запасов активности и характеристик радиотоксичности ОЯТ учитывает «возраст» каждой из 5294 ОТВС, выгружаемой из активных зон реакторов блоков № 1 и 2 в течение проектного времени жизни 60 лет Белорусской АЭС. Модель учитывает также дополнительное накопление  $^{237}\text{Np}$  за счет распада материнского радионуклида  $^{241}\text{Am}$ , что в наибольшей степени проявляется на долговременном этапе обращения с ОЯТ.

Проведен сравнительный анализ характеристик радиотоксичности долгоживущих радионуклидов, который показал, что на долговременном этапе обращения (до 10 тыс. лет) основной вклад в потенциальную биологическую опасность ОЯТ определяют актиниды, радиотоксичность которых на три порядка выше, чем у продуктов деления. Расчетный анализ показал, что изотопы  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  – одни из тех актинидов, которые накапливаются в наибольших количествах в отработавшем ядерном топливе ядерного топливного цикла Белорусской АЭС, причем, вклад  $^{237}\text{Np}$  в общую радиотоксичность на долговременном этапе обращения увеличивается в 20 раз по сравнению с его содержанием на промежуточном этапе (до 100 лет).

Таким образом, показано, что на долговременном этапе потенциальная биологическая опасность всего ОЯТ без переработки и извлечения изотопов  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$  в значительной степени будет обуславливаться вкладом  $^{237}\text{Np}$ . Полученные результаты могут быть использованы для обоснования требований к фракционированию (извлечению  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Am}$ ) при переработке ОЯТ Белорусской АЭС для обеспечения долговременной безопасности при обращении с ВАО его переработки.

### Список использованных источников

1. Оценка запасов активности по номенклатуре основных радиационно-опасных радионуклидов при долговременном обращении с отработавшим ядерным топливом Белорусской АЭС / Ю. А. Корчева [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 2. – С. 243–251. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>
2. Расчетные исследования радиотоксичности облученного топлива ВВЭР-1200 и запасов активности при долгосрочном обращении с ОЯТ Белорусской АЭС / Ю. А. Корчева [и др.] // Изв. Рос. акад. наук. Сер. физическая. – 2020. – Т. 84, № 10. – С. 1509–1513.
3. Analysis of potential hazard of the spent nuclear fuel at the intermediate and long-term stages of the nuclear fuel / J. A. Korchova [et al.] // Nonlinear Dynamics and Applications: Proc. of the 28<sup>th</sup> Anniversary Seminar NPC-2021, May 18–21, 2021, Minsk, Belarus. – Minsk, 2021. – Vol. 27. – P. 217–227.
4. Лопаткин, А. В. Условия достижения радиационной эквивалентности природного сырья и долгоживущих радиоактивных отходов в ядерной энергетике России / А. В. Лопаткин, И. В. Платонов, В. Е. Попов // Атом. энергия. – 2020. – Т. 129, вып. 4. – С. 194–199.

5. A Basic Toxicity classification of radionuclides. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 1963. – 45 p. – (Technical Reports series; 15).

6. Верификация и использование комплекса математических программ для оценки запасов радиоактивности в обеспечении безопасности ядерных установок на промплощадке АЭС [Электронный ресурс] / Н. В. Горбачева [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф., Подольск, 26–29 мая 2009 г. / ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС». – Подольск, 2009. – Режим доступа: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a76/npa-yrb-1.pdf>

## References

1. Korchova J. A., Harbachova N. V., Kuzmina N. D., Kulich N. V. Assessment of activity resources by nomenclature of main radiation-hazardous radionuclides during the long-term management of spent nuclear fuel of the Belarusian NPP. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 2, pp. 243–251 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-2-243-251>

2. Korchova J. A., Harbachova N. V., Kuzmina N. D., Kulich N. V., Petrovskiy A. M. Computational Studies of the Radiotoxicity of Irradiated WWER-1200 Fuel and Its Loss of Activity during the Long-Term Treatment of Spent Nuclear Fuel from the Belarusian NPP. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2020, vol. 84, no. 10, pp. 1300–1303. <https://doi.org/10.3103/S1062873820100159>

3. Korchova J. A., Harbachova N. V., Kuzmina N. D., Kulich N. V., Yatsko S. N. Analysis of potential hazard of the spent nuclear fuel at the intermediate and long-term stages of the nuclear fuel. *Nonlinear Dynamics and Applications: Proceeding of the 28<sup>th</sup> Anniversary Seminar NPC-2021, May 18–21, 2021, Minsk Belarus*. Minsk, 2021, vol. 27, pp. 217–227.

4. Lopatkin A. V., Platonov I. V., Popov V. E. Conditions for Reaching Radiation Equivalence of Native Raw Materials and Long-Lived Radioactive Waste in Nuclear Energy in Russia. *Atomic Energy*, 2020, vol. 129, iss. 4, pp. 188–193. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00732-9>

5. *A Basic Toxicity classification of radionuclides. Technical reports series no. 15*. Vienna, IAEA, 1963. 45 p.

6. Gorbacheva N. V., Beresneva N. V., Kulich N. V., Skurat V. V. Verification and use of a set of mathematical programs for assessing radioactivity reserves to ensure the safety of nuclear installations at the NP site. *Obespechenie bezopasnosti AES s VVER: materialy 6-i Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Ensuring the Safety of Nuclear Power Plants with WWER: Reports of the 6<sup>th</sup> International Scientific and Technical Conference]. Podol'sk, 2009. Available at: <https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/a76/npa-yrb-1.pdf> (in Russian).

## Информация об авторах

*Горбачева Наталья Владимировна* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: [harbachova.nv@sosny.bas-net.by](mailto:harbachova.nv@sosny.bas-net.by)

*Корчева Юлия Александровна* – научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: [julia.korchova@sosny.bas-net.by](mailto:julia.korchova@sosny.bas-net.by)

*Кузьмина Наталья Дмитриевна* – старший научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: [ndkuzmina@sosny.bas-net.by](mailto:ndkuzmina@sosny.bas-net.by)

*Кулич Николай Васильевич* – старший научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования

## Information about the authors

*Natalia V. Harbachova* – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: [harbachova.nv@sosny.bas-net.by](mailto:harbachova.nv@sosny.bas-net.by)

*Julia A. Korchova* – Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: [julia.korchova@sosny.bas-net.by](mailto:julia.korchova@sosny.bas-net.by)

*Natalia D. Kuzmina* – Senior Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: [ndkuzmina@sosny.bas-net.by](mailto:ndkuzmina@sosny.bas-net.by)

*Nikolai V. Kulich* – Senior Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: [2993826@mail.ru](mailto:2993826@mail.ru)

атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: 2993826@mail.ru

*Яцко Светлана Николаевна* – старший научный сотрудник лаборатории детерминистического и вероятностного анализа безопасности объектов использования атомной энергии, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (47/17, д. Прилесье, 223063, Луговослободской с/с, Минский р-н, Минская обл., Республика Беларусь). E-mail: snyacko@sosny.bas-net.by

*Svetlana N. Yacko* – Senior Researcher at the Laboratory for Deterministic and Probabilistic Safety Analysis of Nuclear Facilities, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus (47/17, Prilesye village, 223063, Lugovoslobodskaya village, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: snyacko@sosny.bas-net.by

**И. В. Жук<sup>1</sup>, К. В. Гусак<sup>1</sup>, Д. А. Хакимов<sup>1,2</sup>**<sup>1</sup>*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований –  
Сосны Национальной академии наук Беларуси, Минск, Беларусь*<sup>2</sup>*Самаркандский государственный университет, Самарканд, Узбекистан***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
КОНЦЕНТРАЦИИ РАДОНА В ПРОБАХ МИНЕРАЛЬНОЙ РАДОНОВОЙ ВОДЫ**

**Аннотация.** Представлены результаты исследования по выбору оптимальной геометрии измерения, измерительной емкости и способа герметизации измерительной емкости для определения концентрации радона-222 в пробах минеральной радоновой воды. Исследования проб радоновой воды проводились в лабораторных условиях на стационарном гамма-спектрометре на основе полупроводникового Ge(Li)-детектора. Измерения концентрации в пробах проведены в соответствии с МВИ.МН 3421-2010 «Методика выполнения измерений объемной и концентрация гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами» для стандартных пластиковых сосудов «Дента, 0,1 л» и «Маринелли, 1 л», а также стеклянных емкостей объемом 0,5 л с крышками под закрутку и под закатку. Результаты исследований показали, что утечка радона из стеклянной емкости с металлической крышкой под закатку минимальна. Данный способ отбора проб и герметизации измерительной емкости позволяет повысить точность представляемых результатов измерений за счет уменьшения поправок на пробоподготовку при расчете расширенной неопределенности измерений. Стеклянная емкость объемом 0,5 л с металлической крышкой под закатку использована при проведении измерений концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды, отобранных из скважин и питьевого фонтана санатория «Радон» ОАО «Белагроздравница» (Дятловский район, Гродненская область). Диапазон значений концентрации составил 760–2100 Бк/кг. Выбранная измерительная емкость, способ ее герметизации и геометрия измерений может использоваться для будущих измерений концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды, отобранных в санаториях Республики Беларусь.

**Ключевые слова:** минеральные радоновые воды, радон-222, гамма-спектрометрия, концентрация радона, эманиация радона

**Для цитирования:** Жук, И. В. Использование метода гамма-спектрометрии для определения концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды / И. В. Жук, К. В. Гусак, Д. А. Хакимов // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2023. – Т. 68, № 1. – С. 82–88. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-82-88>

**Igor V. Zhuk<sup>1</sup>, Krystina V. Husak<sup>1</sup>, Dilshod A. Hakimov<sup>1,2</sup>***Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus**<sup>2</sup>Samarkand State University, Samarkand, Uzbekistan,***USING THE GAMMA SPECTROMETRY METHOD TO DETERMINE THE CONCENTRATION  
OF RADON IN SAMPLES OF MINERAL RADON WATER**

**Abstract.** The results of a study on the choice of the optimal measurement geometry, measuring capacity and method of sealing the measuring capacity for determining the concentration of radon-222 in samples of mineral radon water are presented. Studies of radon water samples were carried out in laboratory conditions on a stationary gamma spectrometer based on a semiconductor Ge(Li) detector. The concentration measurements in the samples were carried out in accordance with MVI. MN 3421-2010 “Methodology for measuring the volumetric and concentration of gamma-emitting radionuclides on gamma spectrometers with semiconductor detectors” for standard plastic vessels “Denta, 0.1 l” and “Marinelli, 1 l”, and glass containers with a volume of 0.5 l with lids for twisting and seaming. The results of the research showed that the leakage of radon from a glass container with a metal lid for sealing is minimal. This method of sampling and sealing the measuring vessel makes it possible to increase the accuracy of the presented measurement results by reducing the corrections for sample preparation when calculating the expanded measurement uncertainty. A glass container with a volume of 0.5 l with a metal cap for seaming was used to measure the concentration of radon in samples of mineral radon water taken from wells and a drinking fountain of the Radon sanatorium of Belagrozdravnitsa JSC (Dyatlovo District, Grodno Region). The concentration range was 760–2100 Bq/kg. The selected measuring container, the method of its sealing and the measurement geometry can be used for future measurements of the radon concentration in samples of mineral radon water taken in the sanatoriums of the Republic of Belarus.

**Keywords:** mineral radon waters, radon-222, gamma spectrometry, specific activity of radon, radon emanation

**For citation:** Zhuk I. V., Husak K. V., Hakimov D. A. Using the gamma spectrometry method to determine the concentration of radon in samples of mineral radon water. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2023, vol. 68, no. 1, pp. 82–88 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2023-68-1-82-88>

**Введение.** В природе существует три природных радиоактивных ряда, которые начинаются с радионуклидов: ряд тория ( $4n$ ) – начинается с тория-232 ( $^{232}\text{Th}$ ), ряд радия ( $4n + 2$ ) – с урана-238 ( $^{238}\text{U}$ ) и ряд актиния ( $4n + 3$ ) – с урана-235 ( $^{235}\text{U}$ ). Каждый из этих рядов заканчивается образованием различных стабильных изотопов свинца [1]. Концентрация этих радиоизотопов в воде зависит от типа породы, наличия разломов, разнообразия минералов, присутствующих в породе, пористости-проницаемости; физико-химических свойств и характера геологических водоносных горизонтов [2].

Источниками радона (Rn) являются природные концентрации урана (U) и радия-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) в почвах и горных породах [3]. Наряду с этим вода как универсальный растворитель также играет роль в процессах поступления U и  $^{226}\text{Ra}$  в глобальный круговорот веществ. Соприкасаясь с материалом пород при фильтрации через поры и трещины, вода растворяет соли данных элементов и выводит их из недр земной коры на поверхность. Концентрации радона в воде зависят от концентрации тория, урана, радия и других материнских элементов в горных породах, омываемых ею, коэффициента эманирования, пористости или трещиноватости горных пород и скорости движения воды. Рыхлые или трещиноватые породы характеризуются повышенными концентрациями радона. Количество радона в воде превышает концентрацию радия в десятки и сотни раз [4].

Радон – радиоактивный одноатомный инертный газ, самый тяжелый из благородных газов: его плотность при 0 °C равна 9,81 кг/м<sup>3</sup>, что почти в 7,6 раз больше плотности воздуха. Растворимость радона в воде составляет 460 мл/л. Все изотопы радона радиоактивны и имеют короткие периоды полураспада: период полураспада  $^{222}\text{Rn}$  равен 3,82 сут,  $^{220}\text{Rn}$  (торона) – 55,6 сут,  $^{219}\text{Rn}$  (актиона) – 3,96 сут. Ввиду очень коротких периодов полураспада изотопов радона  $^{219}\text{Rn}$  и  $^{220}\text{Rn}$  в воде содержится лишь 222-й изотоп радона –  $^{222}\text{Rn}$  и дочерние продукты его распада ( $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Bi}$ ,  $^{210}\text{Po}$  и др.) [5, 6].

Воды, содержащие радон, широко используют для лечебного воздействия в санаториях. Радоновые ванны можно приготовить как искусственным образом из препарата радия-226, который имеется в виде растворенных солей, так и с использованием природных минеральных радоновых вод, добываемых из пробуренных скважин. Ванны, приготавливаемые из минеральных радоновых вод, ценятся из-за их уникального минерального состава. В табл. 1 приведены концентрации радона-222 в минеральных водах некоторых мировых курортов [7].

Таблица 1. Концентрации радона-222 в минеральных водах некоторых мировых курортов  
Table 1. Radon-222 concentrations in mineral waters of some world resorts

Название курорта	Концентрация радона в воде
<i>Россия</i>	
Пятигорск	500–7880 Бк/л
Белокуриха	240–375 Бк/л
«Увильды», южный Урал	1,2–17,6 кБк/л
<i>Германия</i>	
Бад-Брамбах, федеральная земля Саксония	1,3–27,9 кБк/л
Баден-Баден, федеральная земля Баден-Вюртемберг	До 70 кБк/л
Бад-Шлема, федеральная земля Саксония	до 182 кБк/л
<i>Австрия</i>	
Гаштайн – бальнеологический курорт и климат, в Тирольских Альпах	До 8 кБк/л
Бадгастайн Бад-Гаштайн, федеральная земля Зальцбург	740 Бк/л (средняя)
<i>Япония</i>	
Мисаса, уезд Тобаку префектуры Тоттори	82–3000 Бк/л
Мисаса онсэн	130 кБк/л

Окончание табл. 1

Название курорта	Концентрация радона в воде
<i>Другие страны</i>	
Хмельник, Винницкая область, Украина	3,7–7,5 кБк/л
Цхалтубо, Грузия	520 Бк/л
Яхимов, Чехия	0,7–6,3 кБк/л
Искья, Италия	До 5 кБк/л
Хевиз, Венгрия	49–393 Бк/л
Икаррия, Греция	До 8 кБк/л

Минеральные радоновые воды по концентрации в них радона подразделяют на пять групп [7]: 1 – очень слабой концентрации, 37,5–375 Бк/л; 2 – слабой концентрации, 375–1500 Бк/л; 3 – средней концентрации, 1,5–4,5 кБк/л; 4 – сильной концентрации, 4,5–7,5 кБк/л; 5 – очень сильной концентрации, 7,5 кБк/л.

В Беларуси природные минеральные радоновые воды до настоящего времени обнаружены и эксплуатируются в основном в Дятловском и Гродненском районах Гродненской области, а также в Минской области (санаторий «Сосновый бор» в г. п. Радошковичи Молодечненского района). Так, в 1989 г. пробурены и введены в эксплуатацию четыре скважины, принадлежащие санаторию «Радон» (филиал «Санаторий Радон» ОАО «Белагроздравница», Гродненская область). Минеральной радоновой водой из этих же скважин обеспечивается санаторий «Альфа Радон» (филиал «Санаторий Альфа Радон» ООО «ТОРВЛАД», Гродненская область). В санаториях «Озерный», «Поречье» (Гродненская область) и «Сосновый бор» (Минская область) пробурены и эксплуатируются по одной скважине. Добытая из этих скважин подземная минеральная вода используется для организации лечебных процедур в виде радоновых ванн, ванн для орошения, для подводного вытяжения и других процедур.

Почти все радионуклиды, обнаруженные в воде, имеют природное происхождение. Особо опасными элементами в воде, которые могут наносить вред здоровью человека, являются радий и радон. Радон является альфа-излучателем, распадающимся на цепочку потомков гамма-излучателей и альфа-излучателей, а это означает, что атомы радона в воде могут распадаться или превращаться в другие атомы. Присутствие радона-222 в воде может представлять опасность для здоровья людей и окружающей среды, поскольку радон-222 растворяется в воде, что может приводить к потреблению радона человеком и переносу в физические и биологические материалы, такие как отложения, растительность и рыба [8].

Определение концентрации радона-222 в питьевой воде сопряжено с трудностями, поскольку радон легко эмануирует из воды при работе с ней. При взбалтывании и переливании воды из одной емкости в другую происходит эманация растворенного радона. В воде, оставленной для отстаивания, радиоактивность радона снижается, а при кипячении радон полностью высвобождается из воды в атмосферу.

*Цель работы* – проведение исследований по выбору оптимальной измерительной емкости с достаточной степенью герметизации для измерения концентрации радона-222 методом гамма-спектрометрии.

**Материалы и методы исследования.** Исследования по выбору оптимальной геометрии измерения, измерительной емкости и способа герметизации измерительной емкости проводились в лаборатории экспериментальных ядерно-физических измерений и экспертных анализов радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны (ОИЭЯИ – Сосны) на стационарном гамма-спектрометре на основе полупроводникового Ge(Li)-детектора ДГДК-80Б. Концентрация радона-222 в пробах радоновой воды измерялась в соответствии с МВИ.МН 3421-2010 «Методика выполнения измерений объемной и удельной активности гамма-излучающих радионуклидов на гамма-спектрометрах с полупроводниковыми детекторами» (далее – МВИ.МН 3421-2010).

Пробы воды из одного источника помещались в следующие сосуды:

пластиковые сосуды «Маринелли, 1 л» и «Дента, 0,1 л»;

стеклянная банка объемом 0,5 л с винтовой резьбой под завинчивающуюся металлическую крышку (далее – банка с крышкой под закрутку);

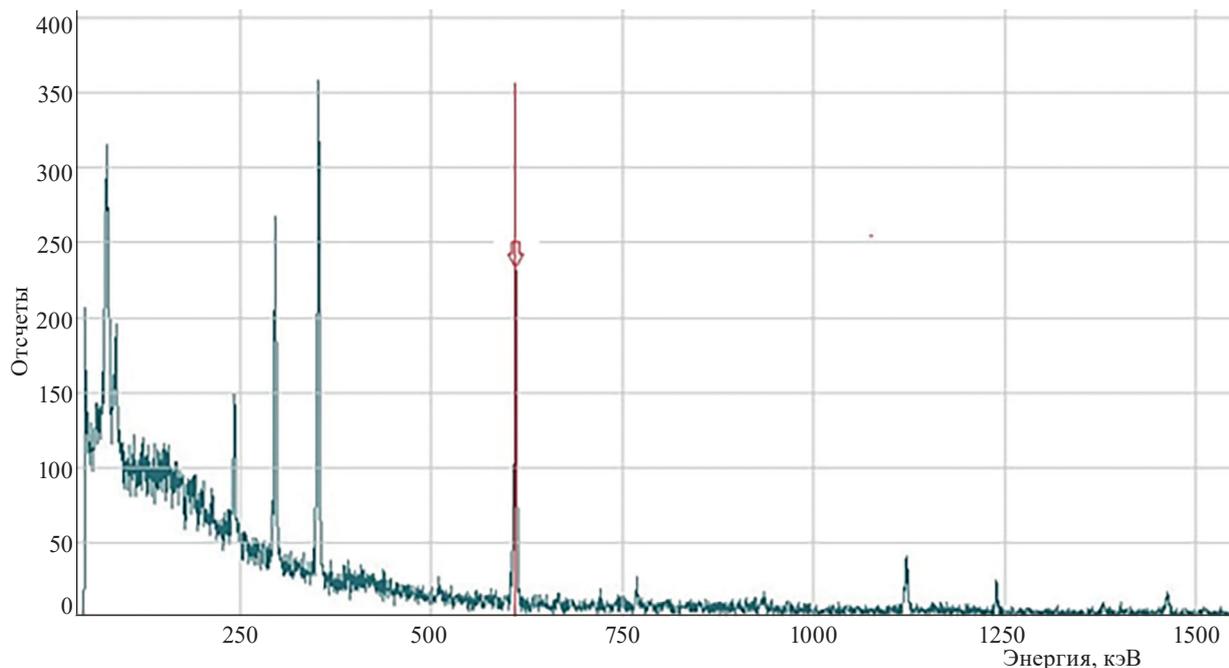


Рис. 1. Гамма-спектр пробы минеральной радоновой воды, полученный с помощью гамма-спектрометра на основе полупроводникового Ge(Li)-детектора ДГДК-80Б (стрелкой показана линия 609,3 кэВ)

Fig. 1. Gamma spectrum of a sample of mineral radon water, obtained using a gamma spectrometer based on a semiconductor Ge (Li) detector DGDK-80B (the arrow shows the 609.3 keV line)

стеклянная банка объемом 0,5 л с металлической крышкой, закрывающаяся при помощи закаточной машинки (далее – банка с крышкой под закатку).

Для нахождения значения активности радона-222 использовалась МВИ.МН 3421-2010. Линия, по которой определялась активность радона-222, принадлежит Bi-214 – дочернему продукту радона-222 с энергией гамма-квантов 609,3 кэВ (квантовый выход 46,1 %). На рис. 1 представлен анализируемый спектр пробы минеральной радоновой воды.

Калибровка гамма-спектрометра по эффективности регистрации в геометриях измерений, соответствующих исследуемым емкостям, проводилась с помощью образцового радиоактивного раствора, который содержал радионуклиды Mn-54, Co-57, Co-60, Cd-109, Ce-139, Cs-137 и Am-241 с известными активностями. Данные калибровки по линии Cs-137 661,6 кэВ использовались для расчета коэффициента, используемого в формуле для определения концентрации радона в воде для каждой геометрии измерений (стеклянная банка, «Дента», «Маринелли») с учетом отношения квантовых выходов для линии 609,3 и 661,6 кэВ (46,1 и 85,1 % соответственно).

Расчет удельной активности радона-222 (Бк/кг) в пробе производился согласно МВИ.МН 3421-2010 по формуле

$$УА = (Rn^{222}) = \frac{n_{\text{пробы}} \cdot \left(\frac{A}{n}\right)_{st}}{m_{\text{пробы}}} \cdot e^{\lambda\tau}, \quad (1)$$

где  $n_{\text{пробы}}$  – скорость счета в пике полного поглощения для линии с энергией 609,3 кэВ для искомой пробы, имп/с;  $m_{\text{пробы}}$  – масса искомой пробы, кг;  $\left(\frac{A}{n}\right)_{st}$  – коэффициент, полученный при помощи образцового радиоактивного раствора, содержавшего радионуклид Cs-137;  $\lambda$  – постоянная распада радона-222, равная  $0,181 \text{ сут}^{-1}$ ;  $\tau$  – время, прошедшее от отбора пробы до измерения, сут;  $e^{\lambda\tau}$  – поправка на распад радона.

**Результаты и их обсуждение.** Пробы радоновой воды, помещенные в каждую из исследуемых емкостей, многократно измерялись через некоторые промежутки времени на протяжении 20 дней и определялась концентрации радона-222 на момент измерения. Зависимость логарифма

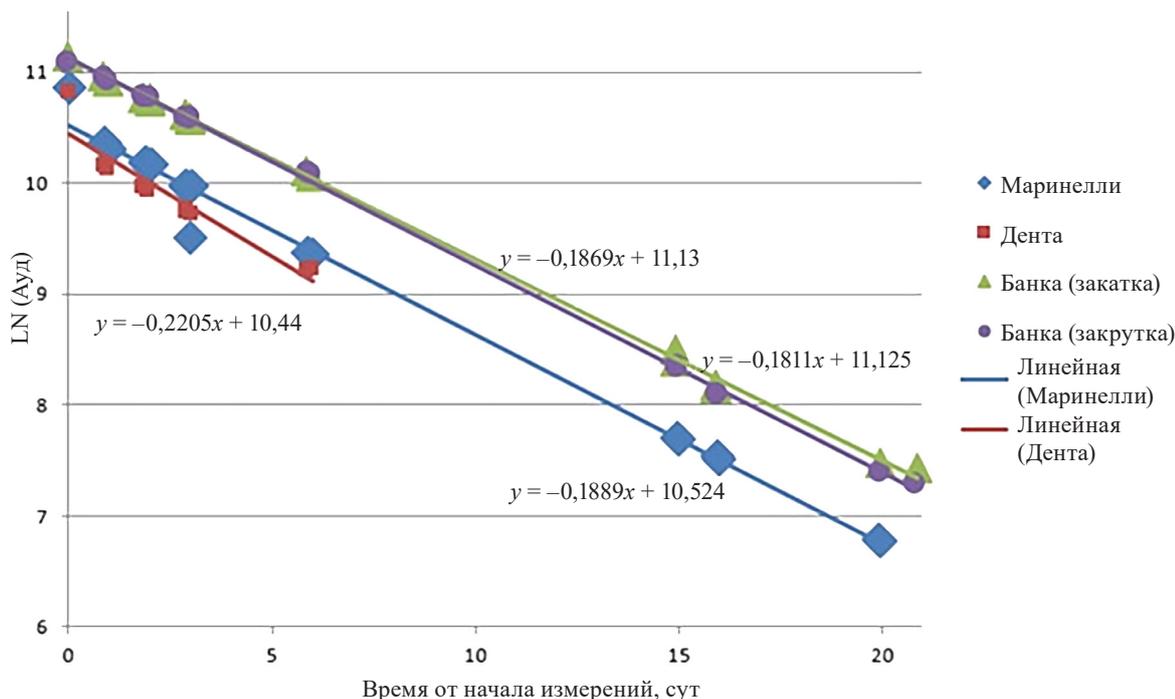


Рис. 2. Зависимость логарифма измеренной активности от времени, прошедшего с момента пробоотбора, и линейная аппроксимация этой зависимости

Fig. 2. The dependence of the logarithm of the measured activity on the time elapsed since sampling, and a linear approximation of this dependence

измеренной активности от времени, прошедшего с момента пробоотбора, а также линейная аппроксимация этой зависимости представлены на рис. 2.

Из графика видно, что линии у пластиковых сосудов («Маринелли, 1 л» и «Дента, 0,1 л») лежат ниже стеклянных. Измеренная концентрация радона в пробах воды в этих сосудах оказалась в 2–2,4 раза ниже, чем в стеклянных емкостях.

Первые измерения в геометриях «Маринелли, 1 л» и «Дента, 0,1 л» не лежат на прямых. Это показывает, что в первые сутки после помещения проб воды в пластиковые емкости активность радона резко падает (в 2 раза).

Все данные хорошо аппроксимируются прямыми линиями, тангенс угла наклона которых равен постоянной распада  $\lambda$ . На рис. 2 значения тангенса угла наклона прямых линий отображены в уравнениях линейной аппроксимации (первый множитель в уравнении). Установлено, что постоянная распада радона-222 равна  $0,181 \text{ сут}^{-1}$ . Для проб воды в стеклянных банках величина постоянной распада близка к справочной, и наилучший результат показывает проба из стеклянного измерительного сосуда в виде банки под закатку. Это позволяет сделать вывод, что утечка радона из стеклянной измерительной емкости с металлической крышкой под закатку практически отсутствует.

Емкость в виде стеклянной банки с металлической крышкой под закрутку также имеет схожие характеристики и может быть использована для отбора проб минеральной радоновой воды и последующих измерений на гамма-спектрометре.

Измерительные емкости из пластика показывают двукратное снижение активности радона в первые сутки после пробоотбора. Эти измерительные емкости можно использовать (при невозможности использовать другие или отсутствии калибровочных измерений в данных геометриях измерений) с соблюдением выдержки проб воды в них в течение суток и применением поправки в 200 % для сосуда «Маринелли, 1 л» и 240 % – для сосуда «Дента, 0,1 л».

**Отбор проб минеральной радоновой воды в санатории «Радон».** Способ отбора проб воды в выбранную оптимальную измерительную емкость был опробован при отборе проб минеральной радоновой воды санатория «Радон» ОАО «Белагроздравница» (Дятловский район,

Гродзенская область). Пробы отобраны 25.03.2020 г. с 9 до 12 ч из скважин № 1–4, а также в питьевом фонтанчике, организованном в беседке на территории санатория.

Перед отбором проб из скважины в течение не менее 4 ч проводилась выкачка радоновой воды из ствола скважины для исключения отбора радоновой воды с пониженной в результате радиоактивного распада радона концентрацией радона-222.

Из каждого места отбора осуществлялся забор от одной до пяти проб. Пробы отбирали в стеклянные банки объемом 0,5 л с крышкой под закрутку и с крышкой под закатку, после чего банку закрывали жестяной крышкой с помощью ручной закаточной машинки. Как уже было установлено, указанный способ обеспечивает герметичность пробы и исключает утечку радона. После отбора пробы транспортировались в течение дня (около 4 ч) в ОИЭЯИ – Сосны (г. Минск) для проведения лабораторных анализов.

Результаты измерения концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды санатория «Радон» ОАО «Белагроздравница» в 2020 г. представлены в табл. 2 в крайнем правом столбце. Для сравнения также даны измерения, проведенные в 2012, 2015 и 2018 гг.

Т а б л и ц а 2. Результаты измерения концентрация радона в пробах минеральной радоновой воды санатория «Радон»

T a b l e 2. The results of measuring the concentration of radon in samples of mineral radon water of the sanatorium “Radon”

№ скважины	Глубина скважины, м	Глубина установки насоса, м	Производительность насоса, м <sup>3</sup> /ч	Концентрация радона-222, Бк/кг			
				2012 г.	2015 г.	2018 г.	2020 г.
1	306	85	10	590 ± 120	610 ± 120	655 ± 140	760 ± 160
2	307	85	2	1930 ± 390	2070 ± 410	1550 ± 310	2100 ± 400
3	295	85	4	1360 ± 270	1340 ± 270	1400 ± 300	1500 ± 300
4	304,6	85	10	990 ± 200	1010 ± 200	900 ± 180	1250 ± 250
Самоизлив *	–	–	–	Не измерялась	Не измерялась	150 ± 20	180 ± 40

\* Питьевой фонтанчик примерно в 300 м от территории санатория.

Как видно из табл. 2, полученные результаты хорошо согласуются с данными измерений концентрации радона в пробах минеральной воды санатория «Радон» ОАО «Белагроздравница», полученными в предыдущие годы.

**Заключение.** В ходе исследований по выбору оптимальной геометрии измерения, измерительной емкости и способа герметизации измерительной емкости для отбора проб минеральной радоновой воды и ее последующего измерения на гамма-спектрометре в лабораторных условиях показано, что утечка радона из стеклянной емкости с металлической крышкой под закатку минимальна. Данный способ отбора проб и герметизации измерительной емкости позволяет повысить точность представляемых результатов измерений за счет уменьшения поправок на пробоподготовку при расчете расширенной неопределенности измерений. Выбранная измерительная емкость, способ ее герметизации и геометрия измерений могут использоваться для будущих измерений концентрации радона в пробах минеральной радоновой воды, отобранных в санаториях Республики Беларусь.

#### Список использованных источников

1. Геворкян, Р. Г. Курс физики / Р. Г. Геворкян. – М.: Высш. школа, 1979. – 656 с.
2. Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards / S. Suresh [et al.] // Journal of Radiation Research and Applied Sciences – 2020. – Vol. 13, № 1. – P. 12–26. <https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1693175>
3. Bonotto, D. M. Radon in groundwaters from Guarany aquifer, South America: environmental and exploration implications / D. M. Bonotto, L. Caprioglio // Appl. Radiat. Isot. – 2002. – Vol. 57, № 6. – P. 931–940. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(02\)00230-0](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(02)00230-0)
4. Бекман, И. Н. Радиохимия: учеб. пособие: в 7 т. / И. Н. Бекман. – М.: изд. Мархотин П. Ю., 2015. – Т. 6: Экологическая радиохимия и радиозоология. – 400 с.

5. Матвеев, А. В. Радонопродуцирующий потенциал пород платформенного чехла территории Беларуси / А. В. Матвеев, М. И. Автушко // *Літасфера*. – 2015. – № 2 (43). – С. 143–149.
6. Радон в природных и техногенных комплексах Беларуси / А. В. Матвеев [и др.] // *Літасфера*. – 1996. – № 5. – С. 151–161.
7. Исследование содержания радона в подземной минеральной воде санаториев Беларуси / М. К. Киевец [и др.] // VI Международная конференция «Ядерные технологии XXI век»: доклады, Минск, 25–27 окт. 2016 г. / НАН Беларуси, Объед. ин-т энергет. и ядер. исслед.; редкол.: А. В. Кузьмин [и др.]. – Минск, 2016. – С. 238–245.
8. Hamzah, Z. Determination of Radon Activity Concentration in Water Using Gamma Spectrometry and Liquid Scintillation Counter Techniques / Z. Hamzah, A. Saat, M. Kassim // 3<sup>rd</sup> International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment, 1–3 June 2011, Melaka, Malaysia. – 2011. – P. 191–193. <https://doi.org/10.1109/ISESEE.2011.5977087>

## References

1. Gevorkyan R. G. *Physics Course*. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1979. 656 p. (in Russian).
2. Suresh S., Rangaswamy D. R., Srinivasa E., Sannappa J. Measurement of radon concentration in drinking water and natural radioactivity in soil and their radiological hazards. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 2020, vol. 13, no. 1, pp. 12–26. <https://doi.org/10.1080/16878507.2019.1693175>
3. Bonotto D. M., Caprioglio L. Radon in groundwaters from Guarany aquifer, South America: environmental and exploration implications. *Applied Radiation and Isotopes*, 2002, vol. 57, no. 6, pp. 931–940. [https://doi.org/10.1016/s0969-8043\(02\)00230-0](https://doi.org/10.1016/s0969-8043(02)00230-0) 2002
4. Beckman I. N. *Radiochemistry. Vol. 6: Ecological Radiochemistry and Radioecology*. Moscow, ed. Markhotin P. Yu., 2015. 400 p. (in Russian).
5. Matveev A. V., Avtushko M. I. Radon-producing potential of the rocks of the platform cover on the territory of Belarus. *Litasfera = Lithosphere*, 2015, no. 2 (43), pp. 143–149 (in Russian).
6. Matveev A. V., Kudel'skii A. V., Aizberg R. E., Naidenkov Yu., Karabanov A. K., Kalora M. Kh., Starodubova A. P. Radon in natural and technogenic complexes Belarus. *Litasfera = Lithosphere*, 1996, no. 5, pp. 151–161 (in Russian).
7. Kievecs M. K. [et al.]. Study of radon content in underground mineral water of sanatoriums of Belarus. *VI Mezhdu-narodnaya konferentsiya «Yadernye tekhnologii XXI vek»: doklady, Minsk, 25–27 oktyabrya 2016 g.* [4<sup>th</sup> International Conference “Nuclear Technologies 21<sup>st</sup> Century”: Reports, Minsk, 25–27 October. 2016]. Minsk, 2016, pp. 238–245 (in Russian).
8. Hamzah Z., Saat A., Kassim M. Determination of Radon Activity Concentration in Water Using Gamma Spectrometry and Liquid Scintillation Counter Techniques. *3<sup>rd</sup> International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment, 1–3 June 2011, Melaka, Malaysia*. 2011, pp. 191–193. <https://doi.org/10.1109/ISESEE.2011.5977087>

## Информация об авторах

*Жук Игорь Владимирович* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией экспериментальных ядерно-физических исследований и экспертных анализов радиоактивных материалов, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь)

*Гусак Кристина Валерьевна* – заведующий сектором экспертной идентификации ИИИ лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь) E-mail: [k.husak@sosny.bas-net.by](mailto:k.husak@sosny.bas-net.by)

*Хакимов Дилшод Абдухалимович* – аспирант, Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси (а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь); младший научный сотрудник, Самаркандский государственный университет (Университетский бульвар, 15, 140104, Самарканд, Узбекистан). E-mail: [hakimov.d@sosny.bas-net.by](mailto:hakimov.d@sosny.bas-net.by)

## Information about the authors

*Igor V. Zhuk* – Ph. D (Engineering), Head of the Laboratory of Experimental Nuclear Physics Research and Expert Analysis of Radioactive Materials, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus).

*Krystina V. Husak* – Head of the Expert Identification Sector of the Institute for Radiochemical Research of Natural Environments and Expertise of Radioactive Materials, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [k.husak@sosny.bas-net.by](mailto:k.husak@sosny.bas-net.by)

*Dilshod A. Hakimov* – Ph. D. Student, Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny (p. o. box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus); Junior Researcher, Samarkand State University (15, University boulevard, 140104, Samarkand, Uzbekistan). E-mail: [hakimov.d@sosny.bas-net.by](mailto:hakimov.d@sosny.bas-net.by)