

# ВЕСЦІ

## НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

---

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2022. Т. 67, № 4

---

# ИЗВЕСТИЯ

## НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

---

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2022. Т. 67, № 4

---

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

**А. П. Ласковнѳв** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь (*заместитель главного редактора*)

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

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

**Ю. Гавлик** – Институт технологии машиностроения и автоматизации производства Краковской политехники имени Тадеуша Костюшко, Краков, Республика Польша

**Г. Жинтялис** – Литовская академия наук, Вильнюс, Литовская Республика

**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. 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
- А. Г. Наумовец** – Национальная академия наук Украины, Киев, Украина
- О. Г. Пенязков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- К. А. Солнцев** – Институт металлургии и материаловедения имени А. А. Байкова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- 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. 2022. Т. 67, № 4

*Выходит на русском, белорусском и английском языках*

---

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

Подписано в печать 12.12.2022. Выход в свет 27.12.2022. 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 242.  
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, 2022

# PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

---

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2022, vol. 67, no. 4

---

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

**Alexander P. Laskovnev** – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk,  
Republic of Belarus (*Associate Editor-in-Chief*)

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

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

**Józef Gawlik** – Institute for Manufacturing Engineering and Automation of Cracow University  
of Technology, Cracow, Republic of Poland

**Gintautas Žintelis** – Lithuanian Academy of Sciences, Vilnius, Republic of Lithuania

**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 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  
**Anton G. Naumovets** – National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine  
**Oleg G. Penyazkov** – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences  
of Belarus, Minsk, Republic of Belarus  
**Konstantsin A. Solntsev** – A. A. Baikov Institute of Metallurgy and Material Science of the Russian Academy  
of Sciences, Moscow, Russian Federation  
**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, 2022, vol. 67, no. 4

*Printed in Russian, Belarusian and English languages*

---

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

It is sent of the press 12.12.2022. Appearance 27.12.2022. 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 242.

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, 2022

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

## **СОДЕРЖАНИЕ**

### **МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ**

- Римский Г. С., Руткаускас А. В., Дюжева-Мальцева Е. В., Янушкевич К. И., Козленко Д. П., Глазков В. П., Туан Ань Чан, Нгок Тоан Данг, Тронг Фук Хоанг.** Магнитные характеристики твердых растворов  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) ..... 351
- Бойправ О. В., Белоусова Е. С., Бордиловская Д. В.** Гетерогенные радиопоглощающие композиционные материалы на основе порошкообразных углей для защиты приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех ..... 360

### **МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**

- Кожевникова Г. В., Щукин В. Я., Дубенец С. С.** Критерии вскрытия осевой полости при поперечно-клиновой прокатке ..... 370

### **ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**

- Малько М. В., Доброго К. В., Василевич С. В., Дегтеров Д. В.** Каталитические свойства некоторых минеральных солей по отношению к процессу разложения пиролитической смолы ..... 379
- Ольшанский А. И., Котов А. А., Кузьменков С. М.** Методы расчета кинетики сушки натуральной кожи ..... 393

### **РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**

- Богатырев Ю. В., Огородников Д. А., Ластовский С. Б., Кетько А. В., Кречко М. М., Шпаковский С. В., Рубанов П. В., Протопопов Г. А., Чубунов П. А.** Влияние ионизирующего излучения на параметры  $p$ -канальных МОП-транзисторов ..... 402
- Легкоступ В. В.** Способ устранения пространственной связи каналов управления объекта, наводимого с помощью двух разностно-дальномерных измерений ..... 409

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

- Кляус В. В., Жукова О. М., Николаенко Е. В., Шайбак А. М., Трусов А. В.** Сравнительный анализ результатов моделирования последствий тяжелой аварии на Белорусской АЭС с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС ..... 421

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

- Rymski G. S., Rutkauskas A. V., Duzeva-Maltseva E. V., Yanushkevich K. I., Kozlenko D. P., Glazkov V. P., Tuan Anh Tran, Ngoc Toan Dang, Trong-Phuc Hoang.** Magnetic characteristics of solid solutions  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) . . . . . 351
- Boprav O. V., Belousova E. S., Bordilovskaya D. V.** Heterogeneous radio absorbing composite materials based on powdered charcoals for electronic devices protection from the electromagnetic radiation impact. . . . . 360

**MECHANICAL ENGINEERING AND MECHANICS**

- Kozhevnikova G. V., Shchukin V. Ya., Dubianets S. S.** Criteria for opening an axial cavity in cross-wedge rolling . . . . . 370

**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER**

- Malko M. V., Dobrego K. V., Vasilevich S. V., Degterov D. V.** Catalytic properties of some mineral salts in relation to the process of decomposition of pyrolysis tar . . . . . 379
- Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M.** Methods of calculating the kinetics of drying of natural leather . . . . . 393

**RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING**

- Bogatyrev Yu. V., Aharodnikau D. A., Lastovsky S. B., Ket'ko A. V., Krechko M. M., Shpakovsky S. V., Rubanov P. V., Protopopov G. A., Chubunov P. A.** Influence of ionizing radiation on the parameters of  $p$ -channel MOS transistors. . . . . 402
- Legkostup V. V.** Method of spatial cross-coupling elimination of control system channels for object guidance using two TDoA measurements . . . . . 409

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

- Kliaus V. V., Zhukova O. M., Nikalayenka A. U., Shaibak A. M., Trusau A. V.** Comparative analysis of the results of simulation of the consequences of a serious accident at a Belarusian NPP with the use of J-RODOS and RECASS-EXPRESS software complexes . . . . . 421

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

УДК 537.622

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-351-359>

Поступила в редакцию 03.10.2022

Received 03.10.2022

**Г. С. Римский<sup>1</sup>, А. В. Руткаускас<sup>2</sup>, Е. В. Дюжева-Мальцева<sup>3</sup>, К. И. Янушкевич<sup>1</sup>,  
Д. П. Козленко<sup>2</sup>, В. П. Глазков<sup>3</sup>, Туан Ань Чан<sup>4</sup>, Нгок Тоан Данг<sup>5</sup>, Тронг Фук Хоанг<sup>5</sup>**<sup>1</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,  
Минск, Республика Беларусь<sup>2</sup>Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Московская область, Российская Федерация<sup>3</sup>Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация<sup>4</sup>Технологический и педагогический университет Хошимина, Хошимин, Вьетнам<sup>5</sup>Университет Дуй Тан, Дананг, Вьетнам**МАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ Ni<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr)**

**Аннотация.** Представлены результаты эксперимента по изучению кристаллической и магнитной структур твердых растворов замещения систем Ni<sub>0,90</sub>M<sub>0,10</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr) с помощью дифракции тепловых нейтронов в интервале температур ~ 3–300 К. Обнаружено, что все исследуемые составы обладают ферромагнитным упорядочением вдоль оси *c*. На спектрах твердых растворов Ni<sub>0,90</sub>V<sub>0,10</sub>MnSb и Ni<sub>0,90</sub>Cr<sub>0,10</sub>MnSb в области 2Θ = 28,6° отмечено появление рефлекса, который указывает на формирование антиферромагнитного упорядочения. Установлено, что данный рефлекс исчезает при температуре *T* = 75 К в Ni<sub>0,90</sub>V<sub>0,10</sub>MnSb, а на спектре Ni<sub>0,90</sub>Cr<sub>0,10</sub>MnSb он наблюдается во всем исследуемом диапазоне температур. В рамках теории функционала плотности (DFT) проведен *ab initio* расчет кристаллической структуры и магнитных моментов для Ni<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr; *x* = 0; 0,125; 0,250). Установлено, что ионы титана, ванадия и хрома участвуют в переносе электрона только с ионами Mn и Sb. Результаты DFT предсказывают существование магнитных моментов у ионов Ti, V и Cr. Обнаружено, что спины ионов Ti, V и Cr антиферромагнитно связаны со спинами ионов Mn и Ni. Полученные результаты представляют интерес для разработки новых концепции и моделей структурного дизайна, при котором возможен синтез принципиально новых функциональных материалов с уже заданными физическими свойствами.

**Ключевые слова:** интерметаллиды, рентгеновская дифракция, дифракция нейтронов, кристаллическая и магнитная структуры, *ab initio* расчет

**Для цитирования:** Магнитные характеристики твердых растворов Ni<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr) / Г. С. Римский [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 351–359. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-351-359>

**Grigory S. Rymski<sup>1</sup>, Anton V. Rutkauskas<sup>2</sup>, Elena V. Duzeva-Maltseva<sup>3</sup>, Kazimir I. Yanushkevich<sup>1</sup>,  
Denis P. Kozlenko<sup>2</sup>, Victor P. Glazkov<sup>3</sup>, Tuan Anh Tran<sup>4</sup>, Ngoc Toan Dang<sup>5</sup>, Trong-Phuc Hoang<sup>5</sup>**<sup>1</sup>Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus<sup>2</sup>Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow Region, Russian Federation<sup>3</sup>National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russian Federation<sup>4</sup>Ho Chi Minh City University of Technology and Education, Ho Chi Minh, Vietnam<sup>5</sup>Duy Tan University, Danang, Vietnam**MAGNETIC CHARACTERISTICS OF SOLID SOLUTIONS Ni<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr)**

**Abstract.** The results of an experiment on the study of the crystal and magnetic structures of substitutional solid solutions of the Ni<sub>0,90</sub>M<sub>0,10</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr) systems using thermal neutron diffraction in the temperature range ~ 3–300 K are presented. It is found that all the studied compositions have ferromagnetic ordering along the *c* axis. In the spectra of Ni<sub>0,90</sub>V<sub>0,10</sub>MnSb and Ni<sub>0,90</sub>Cr<sub>0,10</sub>MnSb solid solutions, a reflection appears in the region 2Θ = 28.6°, which indicates the formation of antiferromagnetic ordering. It has been found that this reflection disappears at a temperature *T* = 75 K in Ni<sub>0,90</sub>V<sub>0,10</sub>MnSb, while it is observed in the spectrum of Ni<sub>0,90</sub>Cr<sub>0,10</sub>MnSb over the entire temperature range under study. Within the framework of density functional theory (DFT), an *ab initio* calculation of the crystal structure and magnetic moments for Ni<sub>1-x</sub>M<sub>x</sub>MnSb (M = Ti,

V, Cr;  $x = 0; 0.125; 0.250$ ) was carried out. It has been established that titanium, vanadium, and chromium ions participate in electron transfer only with Mn and Sb ions. The DFT results predict the existence of magnetic moments for Ti, V, and Cr ions. It was found that the spins of Ti, V, and Cr ions are antiferromagnetically coupled with the spins of Mn and Ni ions. The results obtained are of interest for the development of new concepts and models of structural design, which makes it possible to synthesize fundamentally new functional materials with already specified physical properties.

**Keywords:** intermetallics, X-ray diffraction, neutron diffraction, crystal and magnetic structures, *ab initio* calculation

**For citation:** Rymski G. S., Rutkauskas A. V., Duzeva-Maltseva E. V., Yanushkevich K. I., Kozlenko D. P., Glazkov V. P., Tuan Anh Tran, Ngoc Toan Dang, Trong-Phuc Hoang. Magnetic characteristics of solid solutions  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ). *Vestsi Natsyyanal' nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 351–359 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-351-359>

**Введение.** Изучение физических свойств полуметаллических ферромагнетиков как с фундаментальной, так и с прикладной точек зрения является одной из актуальных задач современной физики конденсированного состояния. Это вызвано тем, что подобные материалы проявляют металлические свойства для одной спиновой зоны, а полупроводниковые – для противоположной зоны, что делает перспективным их применение в спинтронике [1]. Благодаря высоким величинам температуры Кюри, удельной намагниченности и спиновой поляризации к таким материалам можно отнести и соединение  $NiMnSb$ , имеющее 22 валентных электрона. В полугейслеровских сплавах именно количество валентных электронов отвечает за физические свойства соединений [2]. Поэтому частичное замещение никеля другим переходным элементом может существенно изменить магнитные и транспортные свойства исходного соединения [3–5].

*Цель данной работы* – изучение влияния замещения переходными элементами на формирование магнитной структуры в системах  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) с помощью нейтронной дифракции и расчета функционала плотности.

**Синтез образцов и экспериментальные методы.** Составы систем  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) синтезированы методом твердофазных реакций в вакуумированных кварцевых ампулах. Чистота исходных порошков составляла: для Mn – 99,98 %, для Ni, Ti, V и Cr – 99,99 %, для Sb – 99,999 %. Синтез был проведен при температуре 1020 К в течение 24 ч с последующей закалкой. Изучение кристаллической структуры и оценка фазового состава осуществлены методом дифракции рентгеновских лучей в  $CuK_\alpha$ -излучении (длина волны  $\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$ ) при комнатной температуре. Исследования нейтронной дифракции при комнатной температуре для соединения  $MnNiSb$  и  $Ni_{0,90}M_{0,10}MnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) проводились на спектрометре ДН-12 импульсного высокопоточного реактора ИБР-2 (Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований, Россия) [6]. Характерное время измерения одного спектра составляло 2 ч.

Эксперименты по нейтронной дифракции при низких температурах для  $Ni_{0,90}M_{0,10}MnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) выполнены на дифрактометре ДИСК (длина волны  $\lambda = 2,41 \text{ \AA}$ ) нейтронного исследовательского стационарного реактора ИР-8 (Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт», Россия) [7]. Характерное время измерения одного спектра составляло 2 ч. Анализ всех полученных дифракционных данных производился методом Ритвельда с помощью программы FullProf [8]. Расчеты *ab initio* функционала плотности DFT (Density Functional Theory) выполнены с использованием пакета Quantum ESPRESSO [9, 10] с приближением обобщенного градиента GGA (Generalized Gradient Approximation) и параметризации PBE (Perdew–Burke–Ernzerhof) [11]. Псевдопотенциалы ультрамягкого типа Вандербиля (УСПП) [12] трактовались как валентные состояния. Для соединений  $NiMnSb$  и  $Ni_{0,75}M_{0,25}MnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) использовали 12-атомную элементарную ячейку, а для  $Ni_{0,875}M_{0,125}MnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) – 24-атомную. Электронная волновая функция разложена в базисе плоских волн с обрезанием по энергии 80 Ry. Плотность заряда была расширена в базисе с отсечкой плоской волны 500 Ry. В расчете самосогласованного поля использовались  $k$ -сетки Монкхорста–Пака  $8 \times 8 \times 8$  и  $8 \times 8 \times 4$  для 12- и 24-атомной элементарных ячеек соответственно. Расчет и анализ заряда Бейдера выполнен на основе поверхностной плотности заряда с нулевым потоком [13] на оптимизированных структурах. Для расчетов начальной конфигурации использована ферромагнитная конфигурация атомов Mn.

**Результаты эксперимента и их обсуждение.** Ранее проведены исследования кристаллической структуры и магнитных характеристик твердых растворов систем  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti,$

V, Cr) с помощью рентгеновской дифракции, пондеромоторным и вибрационным методами [14–16]. Численные значения основных величин, описывающих кристаллическую структуру и магнитные характеристики, представлены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1. Значения параметра ( $a$ ), расчетной ( $d_{\text{расч}}$ ) и экспериментальной ( $d_{\text{эксп}}$ ) плотностей кристаллической ячейки, среднего магнитного момента при 80 К  $\mu_{80\text{К}}$  и температур Кюри  $T_C$  в твердых растворах  $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$  ( $M = \text{Ti, V, Cr}$ )

Table 1. Values of parameter ( $a$ ), calculated ( $d_{\text{расч}}$ ) and experimental ( $d_{\text{эксп}}$ ) density of the crystal cell, the average magnetic moment at 80 K  $\mu_{80\text{К}}$  and Curie temperatures  $T_C$  in solid solutions  $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$  ( $M = \text{Ti, V, Cr}$ )

$x$	$a$ , нм	$d_{\text{расч}}$ , г/см <sup>3</sup>	$d_{\text{эксп}}$ , г/см <sup>3</sup>	$\mu_{80\text{К}}$ , $\mu_B$	$T_C$ , К
NiMnSb					
0,00	0,592(6)	7,51	7,19	3,81	725
$\text{Ni}_{1-x}\text{Ti}_x\text{MnSb}$					
0,05	0,592(9)	7,48	7,16	3,77	702
0,10	0,593(2)	7,45	7,10	3,58	664
0,15	0,594(3)	7,39	7,11	3,28	631
0,20	0,595(5)	7,33	6,99	2,94	–
0,25	0,596(0)	7,30	6,99	2,76	–
$\text{Ni}_{1-x}\text{V}_x\text{MnSb}$					
0,05	0,593(0)	7,48	7,13	3,80	673
0,10	0,593(2)	7,46	7,19	3,71	611
0,15	0,593(8)	7,43	7,10	3,62	559
0,20	0,594(5)	7,39	7,08	3,47	–
$\text{Ni}_{1-x}\text{Cr}_x\text{MnSb}$					
0,05	0,592(9)	7,49	7,19	3,92	688
0,10	0,593(2)	7,47	7,10	3,89	659
0,15	0,593(6)	7,44	7,13	3,74	–

С целью дальнейшего изучения данных соединений методом дифракции тепловых нейтронов на спектрометре ДН-12 выполнены исследования кристаллической и магнитной структур соединения NiMnSb и твердых растворов  $\text{Ni}_{0,90}\text{M}_{0,10}\text{MnSb}$  ( $M = \text{Ti, V, Cr}$ ) при  $T = 300$  К (рис. 1). Установлено, что все исследуемые составы обладают кубической структурой с пространственной группой  $F\bar{4}3m$ , где атомы занимают позиции: Mn 4b (1/2, 1/2, 1/2), Ni/M 4c (1/4, 1/4, 1/4) и Sb 4a (0, 0, 0) (тип MgAgAs ( $C1_b$ )), а также ферромагнитным упорядочением вдоль оси  $c$ . Численные значения параметров элементарной ячейки и магнитных моментов ионов Mn в твердых растворах  $\text{Ni}_{0,90}\text{M}_{0,10}\text{MnSb}$  ( $M = \text{Ti, V, Cr}$ ) при 300 К представлены в табл. 2. Для MnNiSb магнитный момент ионов Mn составляет  $M = 3,8\mu_B$ . Это значение соответствует ранее полученным результатам [17–19]. Для соединений с замещением ионов никеля титаном и ванадием наблюдается уменьшение магнитного момента на  $\sim 8\text{--}9\%$ , в то время как для ионов хрома значение магнитного момента почти не изменяется.

Рис. 1. Фрагменты нейтронных спектров MnNiSb и  $\text{Ni}_{0,90}\text{M}_{0,10}\text{MnSb}$  ( $M = \text{Ti, V, Cr}$ ), измеренные на дифрактометре ДН-12 при  $T = 300$  К. Вертикальными штрихами показаны рассчитанные положения пиков для кубической и ферромагнитной фаз;  $d_{\text{hkl}}$  – межплоскостное расстояние

Fig. 1. Fragments of the neutron spectra of MnNiSb and  $\text{Ni}_{0,90}\text{M}_{0,10}\text{MnSb}$  ( $M = \text{Ti, V, Cr}$ ), measured on a diffractometer DN-12 at  $T = 300$  K. Vertical strokes show the calculated peak positions for the cubic and ferromagnetic phases;  $d_{\text{hkl}}$  – interplane distance

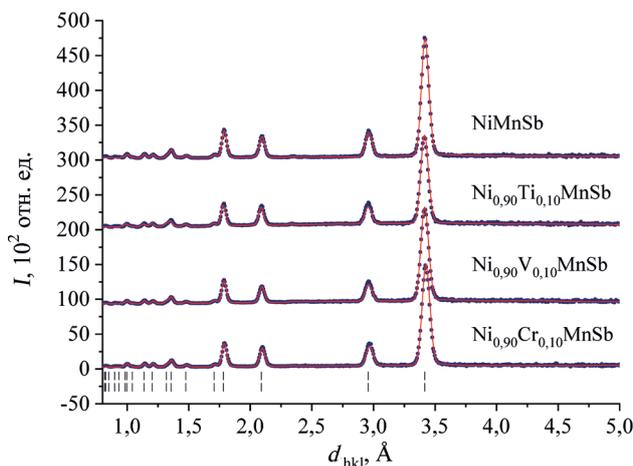
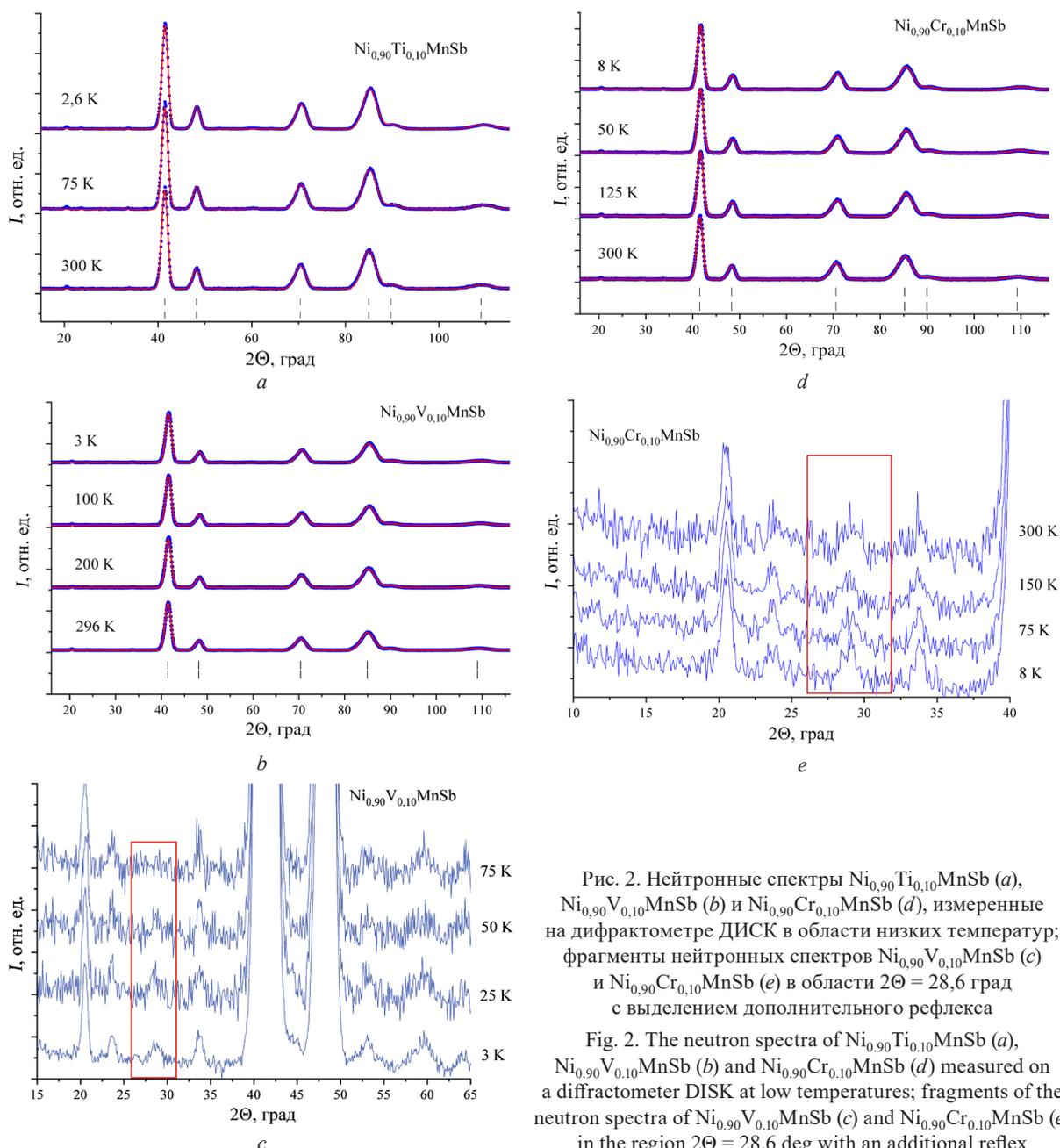


Таблица 2. Значения параметра ( $a$ ), объемов ( $V$ ) и межатомных расстояний кристаллической ячейки, магнитных моментов ионов Mn в соединениях NiMnSb и Ni<sub>0,90</sub>M<sub>0,10</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr) при 300 KTable 2. Values of parameter ( $a$ ), volumes ( $V$ ) and interatomic distances of the crystal cell, magnetic moments of Mn ions in NiMnSb and Ni<sub>0,90</sub>M<sub>0,10</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr) at 300 K

Соединение	$a$ , Å	$V$ , Å <sup>3</sup>	Mn-Ni/M, Å	Sb-Ni/M, Å	M, $\mu_B$
NiMnSb	5,928(6)	208,317	2,5668	2,5668	3,8(7)
Ni <sub>0,90</sub> Ti <sub>0,10</sub> MnSb	5,929(6)	208,422	2,5672	2,5672	3,45(7)
Ni <sub>0,90</sub> V <sub>0,10</sub> MnSb	5,930(1)	208,528	2,5680	2,5680	3,53(7)
Ni <sub>0,90</sub> Cr <sub>0,10</sub> MnSb	5,934(1)	208,960	2,5694	2,5694	3,73(7)

Рис. 2. Нейтронные спектры Ni<sub>0,90</sub>Ti<sub>0,10</sub>MnSb ( $a$ ), Ni<sub>0,90</sub>V<sub>0,10</sub>MnSb ( $b$ ) и Ni<sub>0,90</sub>Cr<sub>0,10</sub>MnSb ( $d$ ), измеренные на дифрактометре ДИСК в области низких температур; фрагменты нейтронных спектров Ni<sub>0,90</sub>V<sub>0,10</sub>MnSb ( $c$ ) и Ni<sub>0,90</sub>Cr<sub>0,10</sub>MnSb ( $e$ ) в области  $2\Theta = 28,6$  град с выделением дополнительного рефлексаFig. 2. The neutron spectra of Ni<sub>0,90</sub>Ti<sub>0,10</sub>MnSb ( $a$ ), Ni<sub>0,90</sub>V<sub>0,10</sub>MnSb ( $b$ ) and Ni<sub>0,90</sub>Cr<sub>0,10</sub>MnSb ( $d$ ) measured on a diffractometer DISK at low temperatures; fragments of the neutron spectra of Ni<sub>0,90</sub>V<sub>0,10</sub>MnSb ( $c$ ) and Ni<sub>0,90</sub>Cr<sub>0,10</sub>MnSb ( $e$ ) in the region  $2\Theta = 28.6$  deg with an additional reflex

Низкотемпературные исследования соединения Ni<sub>0,90</sub>M<sub>0,10</sub>MnSb (M = Ti, V, Cr), проведенные методом нейтронной дифракции на спектрометре ДИСК, показали сохранение исходной кристаллической структуры (рис. 2). В то же время при понижении температуры для всех составов наблюдался небольшой рост интегральной интенсивности структурных пиков, что отра-

жает увеличение магнитных моментов ионов Mn. На спектрах  $Ni_{0,90}V_{0,10}MnSb$  и  $Ni_{0,90}Cr_{0,10}MnSb$  в области  $2\Theta = 28,6^\circ$  было отмечено появление дополнительного рефлекса, указывающего на формирование антиферромагнитного упорядочения. Данный рефлекс исчез при температуре  $T = 75$  К в  $Ni_{0,90}V_{0,10}MnSb$ . В спектре  $Ni_{0,90}Cr_{0,10}MnSb$  этот рефлекс наблюдался во всем диапазоне температур. Численные значения параметров кристаллической ячейки и магнитного момента на ионах Mn в составах  $Ni_{0,90}M_{0,10}MnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Значения параметра кристаллической ячейки ( $a$ ) и магнитных моментов ионов Mn ( $M$ ) в твердых растворах  $Ni_{0,90}M_{0,10}MnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) в зависимости от температуры

T a b l e 3. Values of the parameter of the crystal cell ( $a$ ) and of the magnetic moments of Mn ions ( $M$ ) in  $Ni_{0,90}M_{0,10}MnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) solid solutions depending on temperature

$T, K$	$a, \text{Å}$	$V, \text{Å}^3$	Mn-Ni/M, Å	Sb-Ni/M, Å	$M, \mu_B$
$Ni_{1-x}Ti_xMnSb$					
2,6	5,899(7)	205,275	2,5542	2,5542	3,7(1)
75	5,901(7)	205,483	2,5552	2,5552	3,8(1)
300	5,929(7)	208,422	2,5673	2,5673	3,5(1)
$Ni_{1-x}V_xMnSb$					
3	5,915(8)	206,949	2,5613	2,5613	3,7(2)
25	5,918(8)	207,265	2,5621	2,5621	3,7(2)
50	5,919(8)	207,307	2,5617	2,5617	3,7(2)
75	5,919(8)	207,307	2,5621	2,5621	3,8(2)
100	5,922(8)	207,685	2,5643	2,5643	3,7(2)
125	5,921(8)	207,580	2,5639	2,5639	3,8(2)
150	5,924(8)	207,896	2,5652	2,5652	3,7(2)
200	5,926(8)	208,106	2,5660	2,5660	3,6(2)
296	5,930(8)	208,528	2,5678	2,5678	3,5(2)
$Ni_{1-x}Cr_xMnSb$					
8	5,916(7)	207,054	2,5617	2,5617	4,1(1)
25	5,917(7)	207,159	2,5621	2,5621	4,0(1)
50	5,916(7)	207,054	2,5617	2,5617	4,0(1)
75	5,917(7)	207,159	2,5621	2,5621	4,1(1)
100	5,919(7)	207,37	2,563	2,563	4,1(1)
125	5,920(7)	207,475	2,5634	2,5634	4,1(1)
150	5,923(7)	207,79	2,5647	2,5647	3,9(1)
200	5,925(7)	208,001	2,5656	2,5656	3,8(1)
300	5,934(7)	208,95	2,5695	2,5695	3,7(1)

Т а б л и ц а 4. Теоретически рассчитанные значения параметра кристаллической ячейки ( $a$ ), магнитных моментов ионов ( $\mu$ ) и зарядов Бейдера ( $E$ ) в  $NiMnSb$  и  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) в зависимости от концентрации замещающего элемента

T a b l e 4. Theoretical calculated values of the crystal cell parameter ( $a$ ), magnetic moments of ions ( $\mu$ ) and Bader charges ( $E$ ) in  $NiMnSb$  and  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) depending on the concentration of the substituting element

$x$	$a, \text{Å}$	Mn		Ni		Sb		M	
		$\mu, \mu_B$	$E, e$	$\mu, \mu_B$	$E, e$	$\mu, \mu_B$	$E, e$	$\mu, \mu_B$	$E, e$
$NiMnSb$									
0	5,930	3,637	-0,6555	0,2059	0,5585	-0,0655	0,0970	-	-
$Ni_{1-x}Ti_xMnSb$									
0,125	5,940	3,4942	-0,4804	0,1553	0,5649	-0,0440	0,2840	-0,7406	-0,8496
0,250	6,010	3,5326	-0,4563	0,1483	0,5452	-0,0431	0,2531	-0,7279	-0,8218
$Ni_{1-x}V_xMnSb$									
0,125	5,9179	3,5054	-0,4855	0,1644	0,5801	-0,0351	0,1548	-1,7474	-0,4276
0,250	5,9469	3,4076	-0,4662	0,1213	0,5531	-0,0337	0,1679	-1,7990	-0,4655
$Ni_{1-x}Cr_xMnSb$									
0,125	5,9121	3,5294	-0,5280	0,1883	0,5752	-0,0271	0,1317	-2,5879	-0,1645
0,250	5,9318	3,4494	-0,5238	0,1672	0,5756	-0,0267	0,1330	-2,5934	-0,1637

Для выяснения причины возникновения антиферромагнитной фазы на спектрах нейтронов произведен расчет функционала плотности DFT для соединений  $\text{NiMnSb}$  и  $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$  ( $M = \text{Ti, V, Cr}$ ). Полученные результаты подтверждают стабильность исходной кубической сингонии  $\text{C1}_b$  пространственной группы  $F\bar{4}3m$  при замещении атомов никеля титаном, ванадием и хромом в теоретически исследованных пределах ( $x \geq 0,25$ ). Теоретически рассчитанные значения параметра элементарной ячейки и магнитных моментов, а также заряда Бейдера в зависимости от концентрации замещения представлены в табл. 4. Установлено, что с увеличением замещения никеля  $\text{Ti, V}$  и  $\text{Cr}$  наблюдается расширение элементарной ячейки. Анализ заряда Бейдера показывает, что при замещении  $\text{Ti, V}$  и  $\text{Cr}$  заряды атомов  $\text{Mn}$  и  $\text{Sb}$  значительно изменяются, в то время как для атомов  $\text{Ni}$  наблюдаются лишь незначительные изменения. Это означает, что ионы титана, ванадия и хрома участвуют в переносе электрона только с ионами  $\text{Mn}$  и  $\text{Sb}$ .

На примере системы  $\text{Ni}_{1-x}\text{Ti}_x\text{MnSb}$  ( $x = 0; 0,25$ ) представлены результаты расчета парциальной плотности состояний (рис. 3, *a, c*). Из расчетов PDOS установлено (рис. 3, *b, d*), что исходное соединение  $\text{NiMnSb}$  демонстрирует 100%-ное спин-поляризованное полуметаллическое поведение, область с нижним спином – щель, а область с противоположным спином – нормальное металлическое поведение. Расчеты DFT согласуются с ранее полученными результатами [20]. Ширина щели в полосе нижнего спина составляет около 0,4 эВ, что близко к экспериментально наблюдаемому [21]. PDOS в основном характеризуется большим обменным расщеплением d-состояний  $\text{Mn}$ , расположенных около –3 эВ. Это создает в значительной степени локализованные спиновые моменты около 3,6  $\mu_B$  в узлах  $\text{Mn}$ , что имеет решающее значение для появления полуметаллических свойств в соединении [22]. Спины  $\text{Ni}$  ферромагнитно связаны со спинами  $\text{Mn}$  малыми индуцированными магнитными моментами около 0,2  $\mu_B$  из-за слабого обменного расщепления, а спины  $\text{Sb}$  антиферромагнитно связаны со спинами  $\text{Mn}$ .

В системах  $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$  ( $M = \text{V, Cr}$ ) из расчетов PDOS установлено спин-поляризованное полуметаллическое поведение. В области с нижним спином наблюдается щель, а в области с про-

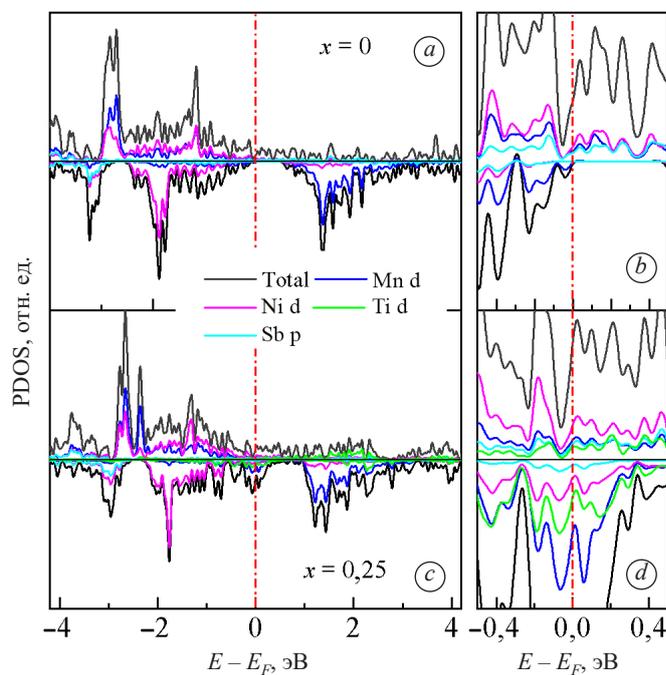


Рис. 3. Парциальная плотность состояний (PDOS) в двух направлениях спина в  $\text{Ni}_{1-x}\text{Ti}_x\text{MnSb}$  при  $x = 0$  (*a*) и 0,25 (*c*). На вставках *b* и *d* показана PDOS возле уровня Ферми

Fig. 3. Partial density of states (PDOS) plotted in the two spin directions of  $\text{MnNi}_{1-x}\text{Ti}_x\text{Sb}$  with  $x = 0$  (*a*) and 0,25 (*c*). The insets *b* and *d* show the enlarged zoom of PDOS around the Fermi

отивоположным спином – нормальное металлическое поведение. Ширина щели в полосе нижнего спина при замещении никеля ванадием составляет около 0,3 эВ для  $x = 0,125$  и 0,24 эВ – для  $x = 0,250$ . При замещении никеля хромом ширина щели в полосе нижнего спина равна 0,4 эВ и 0,3 эВ для  $x = 0,125$  и  $x = 0,250$  соответственно.

Результаты DFT предсказывают существование магнитных моментов у ионов  $\text{Ti, V}$  и  $\text{Cr}$ . Полученное значение магнитного момента для ионов  $\text{Ti}$  составляет около 0,7  $\mu_B$ , что сравнимо с полученными ранее значениями для фазы Магнели  $\text{Ti}_5\text{O}_9$  [23]. Обнаружено, что спины  $\text{Ti, V}$  и  $\text{Cr}$  антиферромагнитно связаны со спинами  $\text{Mn}$  и  $\text{Ni}$ , что объясняет возникновение антиферромагнитного рефлекса на спектрах нейтронов и может служить причиной снижения общей намагниченности при замещении наблюдаемой при исследовании удельной намагниченности твердых растворов систем  $\text{Ni}_{1-x}\text{M}_x\text{MnSb}$  ( $M = \text{Ti, V, Cr}$ ) (см. табл. 1).

**Заключение.** В результате проведенного эксперимента по изучению магнит-

ных характеристик составов систем  $Ni_{1-x}M_xMnSb$  ( $M = Ti, V, Cr$ ) с применением как расчетных, так и экспериментальных методов получены согласованные значения параметра элементарных ячеек ( $a$ ) и магнитных моментов ионов Mn с погрешностью  $\sim 4\%$ , что позволяет относиться с высокой долей доверия к основным результатам. Теоретически предсказано существование магнитных моментов у ионов Ti, V и Cr при замещении никеля в соединении NiMnSb. Обнаружено, что спины Ti, V и Cr антиферромагнитно связаны со спинами Mn и Ni. Установлено, что ионы титана, ванадия и хрома участвуют в переносе электрона только с ионами Mn и Sb. Полученная экспериментальная информация может иметь важное значение для построения моделей формирования уникальных свойств новых типов магнитных материалов.

### Благодарности

Работа выполнена в рамках совместного гранта для молодых ученых «БРФФИ–РФФИ М-2021» (грант № T21PM-029 и № 20-52-04003 Бел\_мол\_a).

### Acknowledgements

The work was carried out within the framework of a joint grant for young scientists “BRFFR–RFFR M-2021” (grant no. T21RM-029 and no. 20-52-04003 Bel\_mol\_a).

### Список использованных источников

1. Review on spintronics: Principles and device applications / A. Hirohata [et al.] // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2020. – Vol. 509. – Art. ID 166711. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166711>
2. Graf, T. Simple rules for the understanding of Heusler compounds / T. Graf, C. Felser, S. S. P. Parkin // *Progress in Solid State Chemistry.* – 2011. – Vol. 39, № 1. – P. 1–50. <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2011.02.001>
3. Effects of substitution of Zn for Ni in NiMnSb alloys / S. K. Ren [et al.] // *J. Alloys Compd.* – 2004. – Vol. 384, № 1–2. – P. 22–24. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.03.118>
4. Magnetic behavior of half-Heusler alloy  $Cu_{1-x}Ni_xMnSb$  / S. K. Ren [et al.] // *J. Magn. Magn. Mater.* – 2005. – Vol. 288. – P. 276–281. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.09.107>
5. Crossover from antiferromagnetic to ferromagnetic ordering in the semi-Heusler alloys  $Cu_{1-x}Ni_xMnSb$  with increasing Ni concentration / M. Halder [et al.] // *Phys. Rev. B.* – 2011. – Vol. 84, № 9. – Art. ID 094435. <http://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.094435>
6. DN-12 time-of-flight high-pressure neutron spectrometer for investigation of microsamples / V. L. Aksenov [et al.] // *Physica B: Phys. Condens. Matter.* – 1999. – Vol. 265, № 1–4. – P. 258–262. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(98\)01392-1](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(98)01392-1)
7. Superposition Many-Detector Systems and Neutron Diffraction of Microsamples / V. P. Glazkov [et al.] // *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A.* – 1988. – Vol. 264, № 2–3. – P. 367–374. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(88\)90925-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90925-4)
8. Rodriguez-Carvajal, J. Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction / J. Rodriguez-Carvajal // *Physica B: Phys. Condens. Matter.* – 1993. – Vol. 192, № 1–2. – P. 55–69. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-1](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-1)
9. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials / P. Giannozzi [et al.] // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2009. – Vol. 21, № 39. – Art. ID 395502. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/39/395502>
10. Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO / P. Giannozzi [et al.] // *J. Phys.: Condens. Matter.* – 2017. – Vol. 29, № 46. – P. 465901. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa8f79>
11. Perdew, J. P. Generalized Gradient Approximation Made Simple / J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof // *Phys. Rev. Lett.* – 1996. – Vol. 77, № 18. – P. 3865–3868. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>
12. Vanderbilt, D. Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism / D. Vanderbilt // *Phys. Rev. B.* – 1990. – Vol. 41, № 11. – P. 7892–7895. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.41.7892>
13. Bader, R. F. W. A quantum theory of molecular structure and its applications / R. F. W. Bader // *Chem. Rev.* – 1991. – Vol. 91, № 5. – P. 893–928. <https://doi.org/10.1021/cr00005a013>
14. Римский, Г. С. Кристаллическая структура и магнитные характеристики твердых растворов  $Ni_{1-x}Cr_xMnSb$  / Г. С. Римский, К. И. Янушкевич, А. В. Руткаускас // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-техн. навук.* – 2021. – Т. 66, № 6. – С. 263–269. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-263-269>
15. Римский, Г. С. Особенности кристаллической структуры и магнитных характеристик твердых растворов  $Ni_{1-x}Ti_xMnSb$  ( $0.00 \leq x \leq 0.50$ ) / Г. С. Римский, К. И. Янушкевич, А. В. Руткаускас // *Вестн. Фонда фундамент. исследований.* – 2021. – Т. 95, № 1. – С. 34–41.
16. Римский, Г. С. Влияние катионного замещения на кристаллическую структуру и магнитные характеристики твердых растворов  $MnNi_{1-x}V_xSb$  / Г. С. Римский, К. И. Янушкевич // *Вестн. Брѣсц. ун-та. Сер. 4, Фізіка. Матэматыка.* – 2021. – № 1. – С. 34–40.
17. Tuning the magnetocaloric response in half-Heusler/Heusler  $MnNi_{1+x}Sb$  solid solutions / E. E. Levin [et al.] // *Phys. Rev. Mat.* – 2017. – Vol. 1, № 7. – Art. ID 075003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.1.075003>
18. De Groot, R. A. FeMnSb: A half-metallic ferrimagnet / R. A. De Groot, A. M. van der Kraan, K. H. J. Buschow // *J. Magn. Magn. Mater.* – 1986. – Vol. 61, № 3. – P. 330–336. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(86\)90046-6](https://doi.org/10.1016/0304-8853(86)90046-6)
19. Atomic and magnetic structure of the heusler alloys NiMnSb and CoMnS / Z. Szytula [et al.] // *Phys. Stat. Sol. (a).* – 1972. – Vol. 9, № 57. – P. 97–103. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210090109>

20. Electronic and magnetic properties of  $\text{NiMn}_{1-x}\text{Ho}_x\text{Sb}$  compounds / R. Grasin [et al.] // *Phys. Stat. Sol. (b)*. – 2012. – Vol. 249, № 9. – P. 1779–1783. <https://doi.org/10.1002/pssb.201147553>
21. Interband Optical Absorption and Plasma Effects in Half-Metallic  $\text{XMnY}$  Ferromagnets / M. M. Kirillova [et al.] // *Phys. Stat. Sol. (b)*. – 1995. – Vol. 187, № 1. – P. 231–240. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221870122>
22. Galanakis, I. Origin and properties of the gap in the half-ferromagnetic Heusler alloys / I. Galanakis, P. H. Dederichs, N. Papanikolaou // *Phys. Rev. B*. – 2022. – Vol. 66, № 13. – Art. ID 134428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.134428>
23. Slipukhina, I. Electronic and magnetic properties of the  $\text{Ti}_5\text{O}_9$  Magnéli phase / I. Slipukhina, M. Lezaic // *Phys. Rev. B*. – 2014. – Vol. 90, № 15. – Art. ID 155133. <https://doi.org/10.1103/physrevb.90.155133>

## References

1. Hirohata A., Yamada K., Nakatani Y., Prejbeanu I.-L., Dieny B., Pirro P., Hillebrands B. Review on spintronics: Principles and device applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2020, vol. 509, art. ID 166711. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2020.166711>
2. Graf T., Felser C., Parkin S. S. P. Simple rules for the understanding of Heusler compounds. *Progress in Solid State Chemistry*, 2011, vol. 39, no. 1, pp. 1–50. <https://doi.org/10.1016/j.progsolidstchem.2011.02.001>
3. Ren S. K., Gao J., Jiang X. L., Ji G. B., Zou W. Q., Zhang F. M., Du Y. W. Effects of substitution of Zn for Ni in  $\text{NiMnSb}$  alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 2004, vol. 384, no. 1–2, pp. 22–24. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2004.03.118>
4. Ren S. K., Zou W. Q., Gao J., Jiang X. L., Zhang F. M., Du Y. W. Magnetic behavior of half-Heusler alloy  $\text{Cu}_x\text{Ni}_{1-x}\text{MnSb}$ . *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2005, vol. 288, pp. 276–281. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2004.09.107>
5. Halder M., Yusuf S. M., Kumar A., Nigam A. K., Keller L. Crossover from antiferromagnetic to ferromagnetic ordering in the semi-Heusler alloys  $\text{Cu}_{1-x}\text{Ni}_x\text{MnSb}$  with increasing Ni concentration. *Physical Review B*, 2011, vol. 84, no. 9, art. ID 094435. <http://doi.org/10.1103/PhysRevB.84.094435>
6. Aksenov V. L., Balagurov A. M., Glazkov V. P., Kozlenko D. P., Naumov I. V., Savenko B. N., Sheptyakov D. V. [et al.] DN-12 time-of-flight high-pressure neutron spectrometer for investigation of microsamples. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 1999, vol. 265, no. 1–4, pp. 258–262. [https://doi.org/10.1016/S0921-4526\(98\)01392-1](https://doi.org/10.1016/S0921-4526(98)01392-1)
7. Glazkov V. P., Naumov I. V., Somenkov V. A., Shilshtein S. Sh. Superposition Many-Detector Systems and Neutron Diffraction of Microsamples. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – section A*, 1988, vol. 264, no. 2–3, pp. 367–374. [https://doi.org/10.1016/0168-9002\(88\)90925-4](https://doi.org/10.1016/0168-9002(88)90925-4)
8. Rodriguez-Carvajal J. Recent advances in magnetic structure determination by neutron powder diffraction. *Physica B: Physics of Condensed Matter*, 1993, vol. 192, no. 1–2, pp. 55–69. [https://doi.org/10.1016/0921-4526\(93\)90108-1](https://doi.org/10.1016/0921-4526(93)90108-1)
9. Giannozzi P., Baroni S., Bonini N., Calandra M., Car R., Cavazzoni C., Ceresoli D. [et al.]. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2009, vol. 21, no. 39, art. ID 395502. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/39/395502>
10. Giannozzi P., Andreussi O., Brumme T., Bunau O., Buongiorno Nardelli M., Calandra M., Car R. [et al.]. Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 2017, vol. 29, no. 46, pp. 465901. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa8f79>
11. Perdew J. P., Burke K., Ernzerhof M. Generalized Gradient Approximation Made Simple. *Physical Review Letters*, 1996, vol. 77, no. 18, pp. 3865–3868. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>
12. Vanderbilt D. Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism. *Physical Review B*, 1990, vol. 41, no. 11, pp. 7892–7895. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.41.7892>
13. Bader R. F. W. A quantum theory of molecular structure and its applications. *Chemical Review*, 1991, vol. 91, no. 5, pp. 893–928. <https://doi.org/10.1021/cr00005a013>
14. Rymiski G. S., Yanushkevich K. I., Rutkauskas A. V. Crystal structure and magnetic characteristics of solid solutions  $\text{Ni}_{1-x}\text{Cr}_x\text{MnSb}$ . *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnuch navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2021, vol. 66, no. 3, pp. 263–269 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2021-66-3-263-269>
15. Rymiski G. S., Yanushkevich K. I. Features of the Crystal Structure and Magnetic Characteristics of Solid Solutions  $\text{Ni}_{1-x}\text{Ti}_x\text{MnSb}$  ( $0.00 \leq x \leq 0.50$ ). *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovanii = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, 2021, vol. 95, no. 1, pp. 34–41 (in Russian).
16. Rymiski G., Yanushkevich K. Effect of Cationic Substitution on the Crystal Structure and Magnetic Properties of Solid Solutions  $\text{MnNi}_{1-x}\text{V}_x\text{Sb}$ . *Vesnik Brestskaga Źniversiteta. Seryya 4. Fizika. Matematyka = Vesnik of Brest University. Series 4. Physics. Mathematics*, 2021, no. 1, pp. 30–40 (in Russian).
17. Levin E. E., Bocarsly J. D., Wyckoff K. E., Pollock T. M., Seshadri R. Tuning the magnetocaloric response in half-Heusler/Heusler  $\text{MnNi}_{1+x}\text{Sb}$  solid solutions. *Physical Review Materials*, 2017, vol. 1, no. 7, art. ID 075003. <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.1.075003>
18. De Groot R. A., Kraan A. M. van der, Buschow K. H. J.  $\text{FeMnSb}$ : A half-metallic ferrimagnet. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 1986, vol. 61, no. 3, pp. 330–336. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(86\)90046-6](https://doi.org/10.1016/0304-8853(86)90046-6)
19. Szytula A., Dimitrijevic Z., Todorovic J., Kolodziejczyk A., Szela J., Wanic A. Atomic and magnetic structure of the heusler alloys  $\text{NiMnSb}$  and  $\text{CoMnS}$ . *Physica Status Solidi (a)*, 1972, vol. 9, no. 57, pp. 97–103. <https://doi.org/10.1002/pssa.2210090109>
20. Grasin R., Rusu C., Laslo A., Dudric R., Mican S., Neumann M., Tetean R. Electronic and magnetic properties of  $\text{NiMn}_{1-x}\text{Ho}_x\text{Sb}$  compounds. *Physica Status Solidi (b)*, 2012, vol. 249, no. 9, pp. 1779–1783. <https://doi.org/10.1002/pssb.201147553>

21. Kirillova M. M., Makhnev A. A., Shreder E. I., Dyakina V. P., Gorina N. B. Interband Optical Absorption and Plasma Effects in Half-Metallic XMnY Ferromagnets. *Physica Status Solidi (b)*, 1995, vol. 187, no. 1, pp. 231–240. <https://doi.org/10.1002/pssb.2221870122>

22. Galanakis I., Dederichs P. H., Papanikolaou N. Origin and properties of the gap in the half-ferromagnetic Heusler alloys. *Physical Review B*, 2022, vol. 66, no. 13, art. ID 134428. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.66.134428>

23. Slipukhina I., Lezaic M. Electronic and magnetic properties of the Ti<sub>5</sub>O<sub>9</sub> Magnéli phase. *Physical Review B*, 2014, vol. 90, no. 15, art. ID 155133. <https://doi.org/10.1103/physrevb.90.155133>

## Информация об авторах

*Римский Григорий Семенович* – научный сотрудник лаборатории физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0001-9958-092X>. E-mail: [rimskiy@physics.by](mailto:rimskiy@physics.by)

*Руткаускас Антон Владимирович* – кандидат физико-математических наук, научный сотрудник Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований (ул. Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Московская область, Российская Федерация). <https://orcid.org/0000-0001-8463-928X>. E-mail: [ranton@nf.jinr.ru](mailto:ranton@nf.jinr.ru)

*Дюжева-Мальцева Елена Вадимовна* – лаборант-исследователь отдела нейтронных экспериментальных станций, Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт» (ул. Академика Курчатова, 1, 123182, Москва, Российская Федерация). E-mail: [elena.dujewa@yandex.ru](mailto:elena.dujewa@yandex.ru)

*Янушкевич Казимир Иосифович* – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией физики магнитных материалов, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0003-3763-6582>. E-mail: [k.yanushkevitch@yandex.by](mailto:k.yanushkevitch@yandex.by)

*Козленко Денис Петрович* – доктор физико-математических наук, начальник научно-экспериментального отдела нейтронных исследований конденсированных сред, Лаборатория нейтронной физики им. И. М. Франка, Объединенный институт ядерных исследований (ул. Жолио-Кюри, 6, 141980, Дубна, Московская область, Российская Федерация). E-mail: [denk@nf.jinr.ru](mailto:denk@nf.jinr.ru)

*Глазков Виктор Павлович* – ведущий специалист отдела нейтронных экспериментальных станций, Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт» (ул. Академика Курчатова, 1, 123182, Москва, Российская Федерация). E-mail: [vivadin@yandex.ru](mailto:vivadin@yandex.ru)

*Туан Ань Чан* – доктор технических наук, факультет прикладных наук, Технологический и педагогический университет Хошимина (ул. Во Ван Нган, 1, 70000, Хошимин, Вьетнам). E-mail: [anhht@hcmute.edu.vn](mailto:anhht@hcmute.edu.vn)

*Нгок Тоан Данг* – доктор физико-математических наук, факультет экологических и естественных наук, Университет Дуй Тан (ул. Нгуен Ван Линь, 254, 550000, Дананг, Вьетнам). E-mail: [dangtoan2107@gmail.com](mailto:dangtoan2107@gmail.com)

*Тронг Фук Хоанг* – доктор физико-математических наук, факультет экологических и естественных наук, Университет Дуй Тан (ул. Нгуен Ван Линь, 254, 550000, Дананг, Вьетнам). E-mail: [hthuc90@gmail.com](mailto:hthuc90@gmail.com)

## Information about the authors

*Grigory S. Rimskiy* – Researcher of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0001-9958-092X>. E-mail: [rimskiy@physics.by](mailto:rimskiy@physics.by)

*Anton V. Rutkauskas* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Researcher of the Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research (6, Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow Region, Russian Federation). <https://orcid.org/0000-0001-8463-928X>. E-mail: [ranton@nf.jinr.ru](mailto:ranton@nf.jinr.ru)

*Elena V. Duzeva-Maltseva* – Research Laboratory Assistant of the Department of Neutron Experimental Facilities, National Research Center “Kurchatov Institute” (1, Kurchatov Str., 123182, Moscow, Russian Federation). E-mail: [elena.dujewa@yandex.ru](mailto:elena.dujewa@yandex.ru)

*Kazimir I. Yanushkevich* – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Physics of Magnetic Materials, Scientific-Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus (19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0003-3763-6582>. E-mail: [k.yanushkevitch@yandex.by](mailto:k.yanushkevitch@yandex.by)

*Denis P. Kozlenko* – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Scientific and Experimental Department of Neutron Investigations of Condensed Matter, Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research (6, Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow Region, Russian Federation). E-mail: [denk@nf.jinr.ru](mailto:denk@nf.jinr.ru)

*Victor P. Glazkov* – Chief Specialist of the Department of Neutron Experimental Facilities, National Research Center “Kurchatov Institute” (1, Kurchatov Str., 123182, Moscow, Russian Federation). E-mail: [vivadin@yandex.ru](mailto:vivadin@yandex.ru)

*Tuan Anh Tran* – Dr. Sc. (Engineering), Applied Sciences Faculty, Ho Chi Minh City University of Technology and Education (1, Vo Van Ngan Str., 70000, Ho Chi Minh, Vietnam). E-mail: [anhht@hcmute.edu.vn](mailto:anhht@hcmute.edu.vn)

*Ngoc Toan Dang* – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Faculty of Environmental and Natural Sciences, Duy Tan University (254, Nguyen Van Linh Str., 550000, Danang, Vietnam). E-mail: [dangtoan2107@gmail.com](mailto:dangtoan2107@gmail.com)

*Trong-Phuc Hoang* – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Faculty of Environmental and Natural Sciences, Duy Tan University (254, Nguyen Van Linh Str., 550000, Danang, Vietnam). E-mail: [hthuc90@gmail.com](mailto:hthuc90@gmail.com)

**О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, Д. В. Бордиловская**

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

## **ГЕТЕРОГЕННЫЕ РАДИОПОГЛОЩАЮЩИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ УГЛЕЙ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ**

**Аннотация.** Представлены результаты теоретического и экспериментального обоснований разработанной авторами методики изготовления гетерогенных (двух- или трехслойных) радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей. Методика основана на послойной заливке в формы смесей гипсового связующего вещества и порошкообразного угля (березового неактивированного, березового активированного, кокосового активированного) в очередности, при которой наружный (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой композиционного материала характеризуется наименьшим волновым сопротивлением, а внутренний – наибольшим волновым сопротивлением. Указанная очередность определена по результатам теоретического обоснования разработанной методики. В ходе ее экспериментального обоснования установлены закономерности изменения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения изготовленных материалов в зависимости от значения частоты этого излучения в диапазоне 0,7–17,0 ГГц. Исходя из установленных закономерностей констатировано, что минимальное значение коэффициента отражения электромагнитного излучения изготовленных согласно разработанной и обоснованной методике двуслойных материалов (толщина ~ 5,0 мм) составляет  $-12,0 \pm 1,0$  дБ и соответствует частотам электромагнитного излучения 0,8 и 2,6 ГГц (при условии, если такие материалы закреплены на металлических подложках). Минимальное значение коэффициента отражения электромагнитного излучения полученных трехслойных материалов (толщина ~ 10,0 мм) при указанном условии также составляет  $-12,0 \pm 1,0$  дБ и соответствует частотам электромагнитного излучения 4,5 и 6,0 ГГц. Значения коэффициента передачи электромагнитного излучения таких материалов уменьшаются со средним шагом 4,0 дБ по мере увеличения на 1,0 ГГц частоты этого излучения в диапазоне 2,0–10,0 ГГц и увеличиваются с аналогичным шагом по мере увеличения на 1,0 ГГц частоты в диапазоне 10,0–17,0 ГГц. Минимальное значение составляет  $-30,0 \pm 2,0$  дБ. Изготовленные согласно разработанной и обоснованной методике материалы представляются перспективными для обеспечения защиты приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех (как активного, так и пассивного типов).

**Ключевые слова:** коэффициент отражения, коэффициент передачи, порошкообразный уголь, радиопоглощающий материал, электромагнитное излучение

**Для цитирования:** Бойправ, О. В. Гетерогенные радиопоглощающие композиционные материалы на основе порошкообразных углей для защиты приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех // О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, Д. В. Бордиловская // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 360–369. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-360-369>

**Olga V. Boiprav, Elena S. Belousova, Daniela V. Bordilovskaya**

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

## **HETEROGENEOUS RADIO ABSORBING COMPOSITE MATERIALS BASED ON POWDERED CHARCOALS FOR ELECTRONIC DEVICES PROTECTION FROM THE ELECTROMAGNETIC RADIATION IMPACT**

**Abstract.** The results of theoretical and experimental substantiation of the technique developed by the authors for the manufacture of heterogeneous (two- or three-layer) radio absorbing composite materials based on powdered charcoals are presented. The technique is based on layer-by-layer pouring of mixtures of a gypsum binder and powdered charcoal (non-activated birch, activated birch, activated coconut) into molds in the order in which the outer (relative to the electromagnetic radiation propagation front) layer of the composite material is characterized by the lowest wave resistance, and the inner layer is characterized by the highest wave resistance. The specified order is determined by the results of the theoretical substantiation of the developed technique. In the course of its experimental substantiation, regularities for changing the electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the manufactured materials depending on the value of the radiation frequency in the range of 0.7–17.0 GHz have been established. Based on the established regularities, it was stated that the min-

imum value of the electromagnetic radiation reflection coefficient of the two-layer materials manufactured according to the developed and substantiated technique (thickness  $\sim 5.0$  mm) is  $-12.0 \pm 1.0$  dB and corresponds to electromagnetic radiation frequencies of 0.8 and 2.6 GHz (it's provided, when such materials are fixed on metal substrates). The minimum value of the electromagnetic radiation reflection coefficient of the three-layer materials (thickness  $\sim 10.0$  mm) under the specified condition is also  $-12.0 \pm 1.0$  dB and corresponds to electromagnetic radiation frequencies of 4.5 and 6.0 GHz. The electromagnetic radiation transmission coefficient values of such materials decrease with an average step of 4.0 dB as the frequency of the radiation increases by 1.0 GHz in the range of 2.0–10.0 GHz and increase with a similar step as the frequency increases by 1.0 GHz in the range of 10.0–17.0 GHz. The minimum value is  $-30.0 \pm 2.0$  dB. The materials manufactured according to the developed and substantiated technique seem to be promising for ensuring the protection of electronic devices from the effects of electromagnetic interference (both active and passive types).

**Keywords:** reflection coefficient, transmission coefficient, powdered charcoal, radio absorbing material, electromagnetic radiation

**For citation:** Boiprav O. V., Belousova E. S., Bordilovskaya D. V. Heterogeneous radio absorbing composite materials based on powdered charcoals for electronic devices protection from the electromagnetic radiation impact. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 360–369 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-360-369>

**Введение.** Защита приборов электронной техники от воздействия электромагнитных помех – задача, решаемая для нужд практической деятельности в рамках таких направлений, как:

разработка радиоизмерительной аппаратуры (обеспечение требуемых характеристик измерительных антенн и/или заданного уровня собственных электромагнитных шумов разрабатываемой аппаратуры) [1, 2];

проведение радиоизмерений (снижение вероятности возникновения случайной погрешности измерений, обусловленной изменениями уровней электромагнитного фона в помещениях, где проводятся измерения) [3, 4];

создание летательных аппаратов и электромобилей (формирование условий для электромагнитной совместимости бортовой аппаратуры) [5–7];

обеспечение информационной безопасности (поддержание целостности информации, обрабатываемой средствами вычислительной техники, или информационных сигналов, передаваемых по каналам связи, как проводным, так и беспроводным) [8–10].

Решение обозначенной задачи, как правило, реализуется за счет использования радиопоглощающих материалов, которые обеспечивают ослабление энергии электромагнитного излучения в СВЧ-диапазоне и характеризуются при этом низкими (по сравнению с металлическими листовыми или сетчатыми материалами) значениями коэффициента отражения электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот. Обозначенная характеристика рассматриваемых материалов обусловлена необходимостью снижения уровня риска, возникающего при эксплуатации приборов электронной техники и связанного с повышением энергии пассивных (переотраженных) электромагнитных помех в местах расположения данного оборудования. Современные радиопоглощающие материалы с низким коэффициентом отражения электромагнитного излучения являются композиционными и изготавливаются путем комбинирования в определенных пропорциях компонентов, обеспечивающих ослабление энергии электромагнитного излучения (волокнистые или дисперсные материалы, характеризующиеся высокими значениями удельной электропроводности и/или магнитной проницаемости), и условий, обуславливающих для изготавливаемых материалов определенные эксплуатационные свойства (температура и влажность окружающей среды). Путем регулирования пропорций, в которых комбинируются указанные компоненты, можно обеспечивать требуемые параметры (значения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения, границы рабочего диапазона частот) изготавливаемых композиционных радиопоглощающих материалов [1, 11–13].

В настоящее время для создания радиопоглощающих материалов широко используются углеродосодержащие компоненты (графит, графен, углеродные нанотрубки) [1, 2, 14–18]. Это связано с тем, что такие материалы обеспечивают высокий уровень потерь энергии взаимодействующего с ними электромагнитного излучения в широком диапазоне частот. Основным недостатком радиопоглощающих материалов на основе перечисленных углеродосодержащих компонентов связан с высокой стоимостью последних. В связи с этим в настоящее время авторами статьи проводятся исследования, направленные на поиск углеродосодержащих компонентов,

перспективных для изготовления радиопоглощающих материалов и характеризующихся более низкой стоимостью по сравнению с применяемыми в настоящее время компонентами. Так, в [19] рассмотрены результаты экспериментального обоснования перспективности использования производимых в настоящее время на промышленной основе порошкообразных углей (березовый неактивированный, березовый активированный, кокосовый активированный) для изготовления радиопоглощающих материалов.

*Цель настоящего исследования* – теоретическое и экспериментальное обоснование методики изготовления гетерогенных (двух- или трехслойных) радиопоглощающих композиционных материалов на основе производимых в настоящее время на промышленной основе порошкообразных углей (березовый неактивированный, березовый активированный, кокосовый активированный).

В ходе достижения поставленной цели были решены следующие пять задач:

1) теоретическое обоснование связующего вещества для изготовления материалов и очередности использования порошкообразных углей обозначенных разновидностей в ходе формирования слоев материалов;

2) выбор оборудования и оснастки, необходимых для изготовления материалов;

3) документирование разработанной методики;

4) изготовление экспериментальных образцов материалов в соответствии с разработанной методикой;

5) установление закономерностей изменения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения изготовленных экспериментальных образцов в зависимости от принадлежащего диапазону 0,7–17,0 ГГц значения частоты этого излучения.

**Методика изготовления и исследования материалов.** По результатам решения первой из обозначенных задач [19] было определено, что для изготовления радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей наиболее целесообразно использовать в качестве связующего вещества гипсовое вяжущее, что обусловлено его следующими преимуществами по сравнению с другими связующими, применяемыми в настоящее время [20]:

низкая стоимость (при условии, что наполнитель(и) композиционного материала характеризуется(ются) сопоставимой стоимостью);

невысокая длительность затвердевания при стандартных условиях, что определяет невысокую технологическую сложность процесса изготовления материала с применением данного связующего вещества.

Также в ходе решения первой задачи установлено, что для обеспечения согласования волнового сопротивления гетерогенных радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей необходимо для формирования их наружного (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя использовать порошкообразный уголь, который характеризуется наименьшим значением удельной электропроводности. Волновое сопротивление каждого последующего (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя должно увеличиваться [21].

На основе результатов исследований, представленных в [19, с. 36], было определено, что из всех производимых в настоящее время на промышленной основе порошкообразных углей наименьшими величинами удельной электропроводности характеризуется березовый неактивированный древесный уголь, а наибольшими – березовый активированный древесный уголь. Удельная электропроводность кокосового активированного угля выше, чем у березового неактивированного, но ниже, чем у березового активированного угля. Значения этих величин зависят от температуры получения угля, а также от длительности этого процесса (то есть от длительности оказываемого на уголь высокотемпературного воздействия). В связи с этим было установлено, что для обеспечения наибольшего согласования волнового сопротивления поверхности гетерогенного (двух- или трехслойного) радиопоглощающего композиционного материала с волновым сопротивлением воздуха (первичная среда распространения электромагнитного излучения) его наружный (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой необходимо формировать на основе березового неактивированного древесного угля, а внутренний – на основе березового активированного.

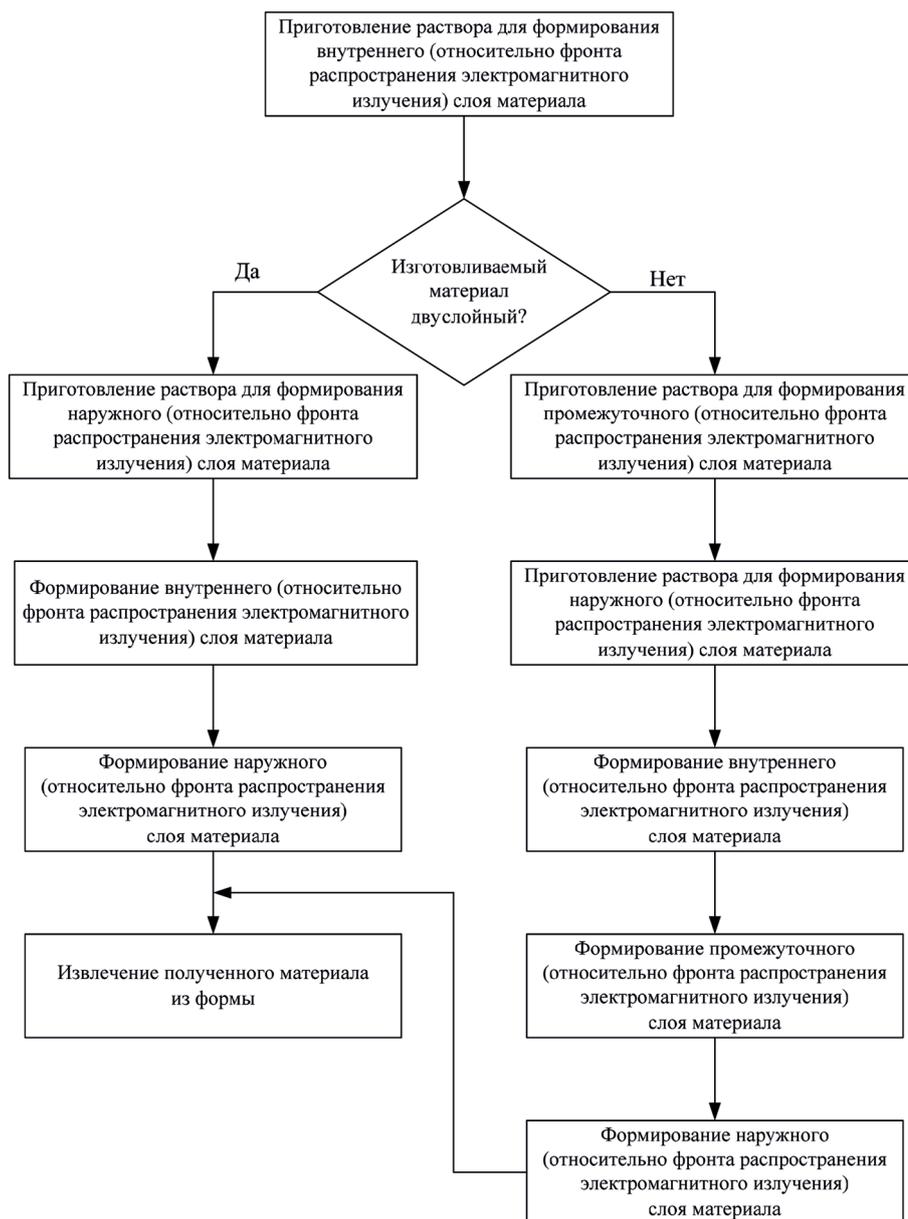


Рис. 1. Схема алгоритма действий в рамках разработанной методики  
 Fig. 1. The scheme of the actions algorithm within the framework of the developed technique

Согласно результатам решения второй из обозначенных задач было определено, что для изготовления радиопоглощающих композиционных материалов на основе выбранных компонентов необходимо использовать мерные емкости (с целью подготовки компонентов растворов, предназначенных для формирования слоев изготавливаемых материалов), строительный миксер (чтобы смешивать компоненты растворов, предназначенных для формирования слоев изготавливаемых материалов), гибкие полимерные формы (для обеспечения требуемых размеров изготавливаемых материалов), эталонный конус, соответствующий ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний» (с целью определения высоты уровня растворов).

По результатам решения третьей задачи было определено, что алгоритм действий в рамках разработанной методики является ветвящимся. Схема этого алгоритма представлена на рис. 1.

Разработанная методика изготовления гетерогенных радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей включает в себя восемь этапов.

*Этап 1.* Приготовление раствора для формирования внутреннего (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя материала путем смешивания с помощью

строительного миксера порошкообразного березового активированного угля, гипсового вяжущего и воды в оптимальном объемном соотношении. Авторами экспериментальным путем было установлено, что оптимальным объемным соотношением, в котором необходимо смешивать указанные ингредиенты при изготовлении гетерогенных радиопоглощающих композиционных материалов на основе порошкообразных углей, является 2 : 3 : 10. Используемый при этом критерий – одновременное выполнение двух условий:

1) поверхность материала, получаемого в результате нанесения на подложку слоем толщиной  $3,0 \pm 1,0$  мм приготовленного раствора и дальнейшего его высушивания, характеризуется отсутствием трещин;

2) в состав материала входит наибольшее количество порошкообразного угля (по сравнению с другими материалами на основе рассматриваемого раствора, для которых выполнимо условие 1).

*Этап 2.* Если изготавливаемый материал является двухслойным, то приготовление раствора для формирования наружного (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя путем смешивания с помощью строительного миксера порошкообразного березового неактивированного угля, гипсового вяжущего и воды в оптимальном объемном соотношении.

Если изготавливаемый материал трехслойный, то приготовление раствора для формирования промежуточного (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя путем смешивания с помощью строительного миксера порошкообразного кокосового активированного угля, гипсового вяжущего и воды в оптимальном объемном соотношении.

*Этап 3.* При условии, что изготавливаемый материал является трехслойным, приготовление раствора для формирования наружного (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слоя материала путем смешивания с помощью строительного миксера порошкообразного березового неактивированного угля, гипсового вяжущего и воды в оптимальном объемном соотношении.

*Этап 4.* Равномерное распределение полученного в ходе реализации этапа 1 раствора по объему гибкой полимерной формы, высота которой составляет не менее 1,0 см, а длина и ширина определяются требованиями к длине и ширине изготавливаемого композиционного материала (высота уровня раствора после его распределения должна составлять  $3,0 \pm 1,0$  мм и измеряться с помощью эталонного конуса, соответствующего ГОСТ 5802-86).

*Этап 5.* Высушивание раствора в гибкой полимерной форме при стандартных условиях.

*Этап 6.* Если изготавливаемый материал является двухслойным, то равномерное распределение полученного в ходе реализации этапа 2 раствора для формирования наружного (относительно фронта распространения электромагнитных волн) слоя по поверхности находящегося в гибкой полимерной форме высушенного раствора, полученного в результате реализации этапов 1, 4 и 5 (высота уровня раствора после его распределения должна составлять  $3,0 \pm 1,0$  мм и измеряться при этом с помощью эталонного конуса, соответствующего ГОСТ 5802-86).

При условии, что получаемая структура является трехслойной, равномерное распределение полученного в ходе реализации этапа 2 раствора для формирования промежуточного (относительно фронта распространения электромагнитных волн) слоя по поверхности находящегося в гибкой полимерной форме высушенного раствора, полученного в результате реализации этапов 1, 4 и 5 (высота уровня раствора после его распределения должна составлять  $3,0 \pm 1,0$  мм и измеряться при этом с помощью эталонного конуса, соответствующего ГОСТ 5802-86).

*Этап 7.* Высушивание раствора в гибкой полимерной форме при стандартных условиях.

*Этап 8.* Если изготавливаемый материал является двухслойным, то извлечение изготовленного материала из формы.

При условии, что изготавливаемый материал является трехслойным:

этап 8.1 – равномерное распределение полученного в ходе реализации этапа 3 раствора по поверхности находящегося в гибкой полимерной форме высушенного раствора, полученного в результате реализации этапов 2 и 7 (высота уровня раствора после его распределения должна составлять  $3,0 \pm 1,0$  мм);

этап 8.2 – высушивание раствора в форме при стандартных условиях;

этап 8.3 – извлечение изготовленного материала из формы.

По результатам решения четвертой из обозначенных задач согласно разработанной методике были изготовлены партия экспериментальных образцов двухслойных радиопоглощающих композиционных материалов и партия экспериментальных образцов трехслойных радиопоглощающих композиционных материалов. Толщина каждого из экспериментальных образцов двухслойных радиопоглощающих композиционных материалов составляла ~ 5,0 мм, а трехслойных – ~ 10,0 мм.

При решении пятой из обозначенных задач выполнялись измерения значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике [19, с. 31] с использованием панорамного измерителя коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18. Выбор частотного диапазона для проведения измерений значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения обусловлен тем, что ему (диапазону) соответствуют высокоэнергетические составляющие спектра электромагнитного излучения современных приборов электронной техники [22].

На основе результатов выполненных измерений были построены графики, соответствующие частотным зависимостям коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике, после чего анализировался характер этих зависимостей.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 2, 3 представлены частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике. Указанные зависимости представлены в двух поддиапазонах (0,7–3,0 ГГц и 3,0–17,0 ГГц) диапазона частот, в котором проводились измерения, в связи с тем, что измерения и аппроксимация значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения с помощью панорамного измерителя SNA 0.01–18 в обозначенных поддиапазонах выполняются с разным шагом: в поддиапазоне 0,7–3,0 ГГц – с шагом 0,009 ГГц, в поддиапазоне 3,0–17,0 ГГц – с шагом 0,059 ГГц.

Из рис. 2 и 3 видно, что значения коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц материалов, изготовленных согласно разработанной методике, изменяются в пределах от –2,0 до –12,0 дБ. Двухслойные материалы обеспечивают отражение взаимодействующего с ними излучения в наименьшей степени при условии, если его частота составляет 2,2 и 5,0 ГГц, а трехслойные материалы – если частота последнего равна 1,6, 4,5, 6,0, 10,5 и 11,5 ГГц (указанные значения являются точками минимума частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения, представленных на рис. 2). Это обусловлено тем, что на указанных частотах разность фаз между электромагнитными волнами, отраженными от границ раздела слоев, является максимальной.

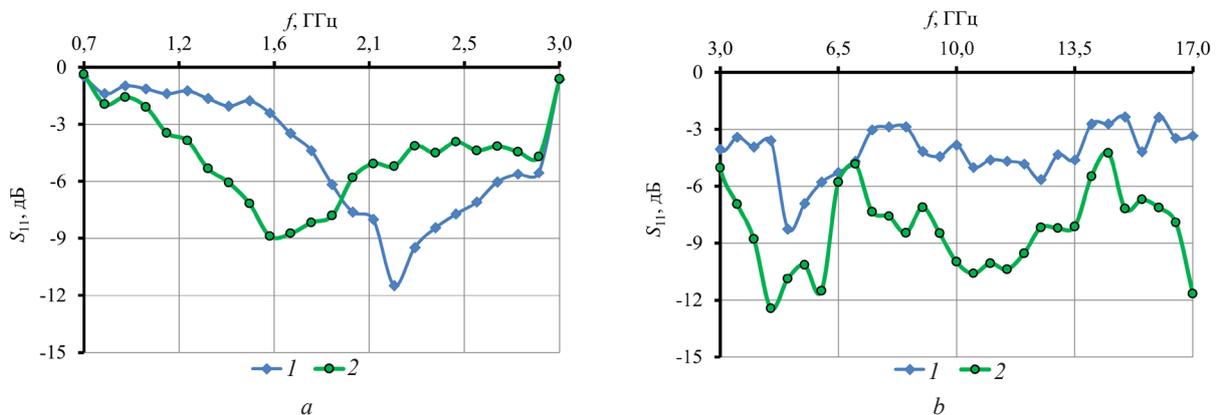


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах 0,7–3,0 ГГц (а) и 3,0–17,0 ГГц (б) двухслойного (кривая 1) и трехслойного (кривая 2) экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике

Fig. 2. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation reflection coefficient in the ranges of 0.7–3.0 GHz (a) and 3.0–17.0 GHz (b) of two-layer (curve 1) and three-layer (curve 2) experimental samples of the materials made according to the developed technique

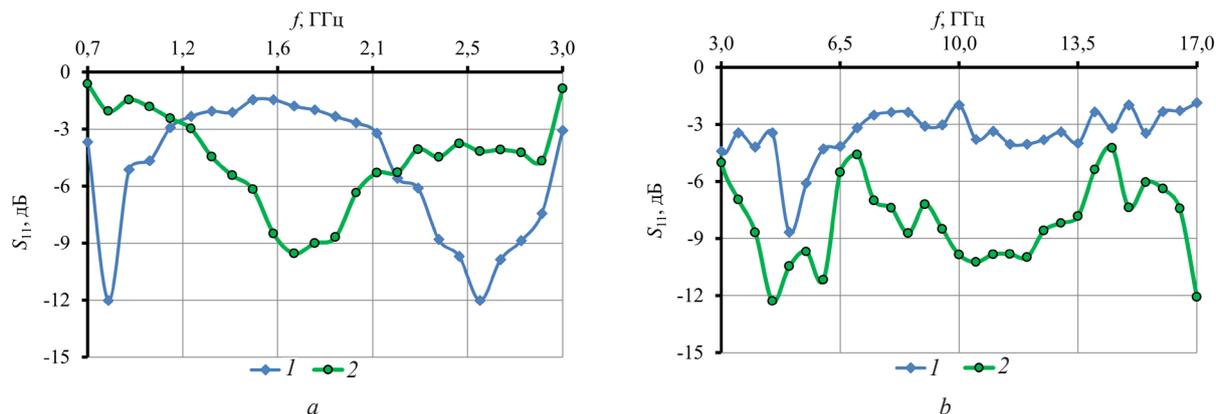


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазонах 0,7–3,0 ГГц (*a*) и 3,0–17,0 ГГц (*b*) двухслойного (кривая 1) и трехслойного (кривая 2) экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике и закрепленных на металлических подложках

Fig. 3. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation reflection coefficient in the ranges of 0.7–3.0 GHz (*a*) and 3.0–17.0 GHz (*b*) of two-layer (curve 1) and three-layer (curve 2) experimental samples of the materials made according to the developed technique and fixed on the metal plates

Значения и количество точек минимума частотных зависимостей коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–3,0 ГГц двухслойных материалов, изготовленных согласно разработанной методике и закрепленных на металлических подложках, отличаются от значений и количества точек минимума аналогичных зависимостей, характерных для таких материалов, не закрепленных на металлических подложках. Указанные значения составляют 0,8 и 2,6 ГГц. Отмеченная особенность связана с тем, что в диапазоне частот 0,7–3,0 ГГц энергия отражаемого рассматриваемыми материалами электромагнитного излучения формируется в результате взаимодействия электромагнитных волн, отражаемых от следующих границ раздела: «воздух – наружный (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой», «наружный (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой – внутренний (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой», «внутренний (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой – металлическая подложка» (в отличие от случая формирования энергии электромагнитного излучения, отражаемого рассматриваемыми материалами, не закрепленными на металлических подложках, при котором отсутствуют волны, отражаемые от границ раздела «внутренний (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой – металлическая подложка»).

Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц, характерные для двухслойных материалов, закрепленных на металлических подложках, и частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–17,0 ГГц, типичные для трехслойных материалов, закрепленных на металлических подложках, несущественно отличаются от аналогичных зависимостей, свойственных этим материалам, не закрепленным на металлических подложках. Это обусловлено тем, что энергия электромагнитных волн, которые отражаются от границ раздела «внутренний (относительно фронта распространения электромагнитного излучения) слой – металлическая подложка» и для которых характерны значения частоты, принадлежащие указанным диапазонам, поглощается в толще материалов.

На рис. 4 представлены частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 0,7–17,0 ГГц экспериментальных образцов материалов, изготовленных по разработанной методике.

Видно, что значения коэффициента передачи электромагнитного излучения изготовленных по приведенной методике материалов уменьшаются со средним шагом 4,0 дБ по мере роста на 1,0 ГГц частоты этого излучения в диапазоне 2,0–10,0 ГГц и увеличиваются с аналогичным шагом по мере возрастания на 1,0 ГГц частоты этого излучения в диапазоне 10,0–17,0 ГГц. Минимальное из таких значений составляет  $-30,0 \pm 2,0$  дБ. Значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–2,0 ГГц таких материалов составляют  $\sim -10,0$  дБ.

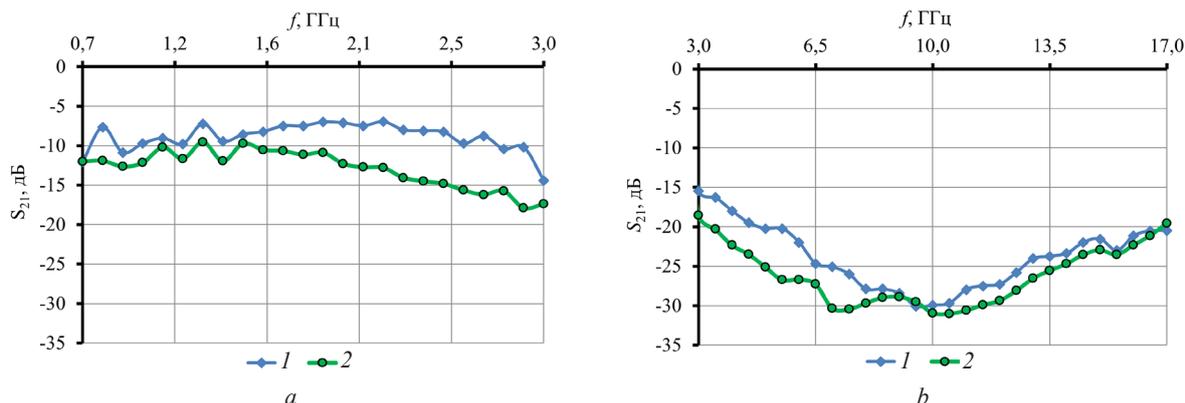


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазонах 0,7–3,0 ГГц (а) и 3,0–17,0 ГГц (б) двуслойного (кривая 1) и трехслойного (кривая 2) экспериментальных образцов материалов, изготовленных согласно разработанной методике

Fig. 4. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation transmission coefficient in the ranges of 0.7–3.0 GHz (a) and 3.0–17.0 GHz (b) of two-layer (curve 1) and three-layer (curve 2) experimental samples of the materials made according to the developed technique

Снижение значений коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0–10,0 ГГц материалов, изготовленных согласно разработанной методике, может быть обусловлено уменьшением глубины проникновения этого излучения (расстояния, которое проходит электромагнитное излучение в толще материала до момента, когда энергия этого излучения уменьшится в  $e$ , то есть в 2,71 раза).

Увеличение значений коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 10,0–17,0 ГГц рассматриваемых материалов может быть обусловлено тем, что значения удельной электропроводности порошкообразных углей снижаются с увеличением частоты электромагнитного излучения в указанном диапазоне.

На основе сравнительного анализа характеристик, представленных на рис. 4, можно заключить, что значения коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц изучаемых трехслойных материалов на 1,0–5,0 дБ ниже значений аналогичного параметра двуслойных материалов, изготовленных согласно разработанной методике. Это обусловлено тем, что трехслойные материалы характеризуются большим количеством границ раздела между средами, отличающимися волновым сопротивлением.

**Заключение.** Таким образом, гетерогенные радиопоглощающие композиционные материалы на основе порошкообразных углей, изготовленные согласно разработанной методике, обеспечивают ослабление до 1000 раз энергии взаимодействующего с ними электромагнитного излучения, и потому являются перспективными для использования в целях защиты приборов электронной техники от воздействия активных электромагнитных помех. Для решения этой задачи такие материалы целесообразно закреплять с помощью строительного клея на стенах помещений, где расположены приборы электронной техники, или использовать при изготовлении перегородок, предназначенных для отделения в таких помещениях секторов, в пределах которых установлены эти приборы. Кроме того, полученные в ходе исследования композиционные материалы представляются перспективными для использования с целью снижения энергии пассивных электромагнитных помех, вносимых в работу приборов электронной техники, расположенных в экранированных с помощью металлических листов помещениях или секторах помещений, так как указанные материалы обеспечивают ослабление до 16 раз энергии электромагнитного излучения, отражаемого от металлических подложек. Для достижения обозначенных целей полученные в ходе исследования композиционные материалы должны закрепляться на поверхностях данных листов.

#### Список использованных источников

1. Dugin, N. Using carbon-based composite materials for manufacturing C-range antenna devices / N. Dugin, T. Zaboronkova, E. Myasnikov // *Latv. J. Phys. Tech. Sci.* – 2016. – Vol. 53, iss. 5. – P. 17–23. <https://doi.org/10.1515/lpts-2016-0032>
2. Carbon-based composite microwave antennas / N. A. Dugin [et al.] // *Electronics.* – 2020. – Vol. 9, iss. 4. – Art. ID 590. <https://doi.org/10.3390/electronics9040590>

3. Radio-absorbing materials based on polymer composites and their application to solving the problems of electromagnetic compatibility / A. Fionov [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14, iss. 15. – Art. ID 3026. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
4. A measuring system for characterization of radar-absorbing materials with sounding ultra-short electromagnetic pulses over the range 0.1–40 GHz / K. Yu. Sakharov [et al.] // *Conference on Microwave Techniques (COMITE 2015), 22–23 April 2015, Pardubice, Czech Republic. – Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015. – Art. ID 15201605. <https://doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120224>*
5. Zhukov, P. A. The application of radar absorbing materials to reduce interference emissions from instruments and devices of spacecraft electrical systems / P. A. Zhukov, V. Yu. Kirillov // *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Vol. 868. – Art. ID 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/868/1/012009>
6. Advanced radar absorbing ceramic-based materials for multifunctional applications in space environment / A. Delfini [et al.] // *Materials*. – 2018. – Vol. 11, iss. 9. – Art. ID 1730. <https://doi.org/10.3390/ma11091730>
7. Electromagnetic Compatibility Issues in Electric Vehicle Applications / A. G. Mamalis [et al.] // *Mater. Sci. Forum.* – 2018. – Vol. 915. – P. 71–76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.915.71>
8. Wu, T.-L. Overview of Signal Integrity and EMC Design Technologies on PCB: Fundamentals and Latest Progress / T.-L. Wu, F. Buesink, F. Canavero // *IEEE Trans. Electromagn. Compat.* – 2013. – Vol. 55, № 4. – P. 624–638. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2257796>
9. Deutschmann, B. Impact of electromagnetic interference on the functional safety of smart power devices for automotive applications / B. Deutschmann, G. Winkler, P. Kastner // *Elektrotechnik und Informationstechnik*. – 2018. – Vol. 135. – P. 352–359. <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0633-4>
10. Protection from electromagnetic pollution by using metal based shielding materials / M. A. A. Frah [et al.] // *J. Phys. Conf. Ser.* – 2021. – Vol. 2056, № 1. – Art. ID 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2056/1/012058>
11. Choudhary, A. Broadband millimeter-wave absorbers: a review / A. Choudhary, S. Pal, G. Sarkhel // *Int. J. Microw. Wirel. Technol.* – 2022. – First View. – P. 1–17. <https://doi.org/10.1017/S1759078722000162>
12. Radio-absorbing materials and technologies for their production / A. Fionov [et al.] // *Polymers*. – 2022. – Vol. 14. – Art. ID 3026. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
13. Electromagnetic evaluation of radar absorbing materials based on conducting polypyrrole and organic–inorganic nanocomposite of polypyrrole/kaolinite / C. P. R. Malere [et al.] // *J. Appl. Polym. Sci.* – 2022. – Vol. 39, iss. 17. – Art. ID 52023. <https://doi.org/10.1002/app.52023>
14. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review / F. Ruiz-Perez [et al.] // *J. Sci.: Adv. Mater. Devices*. – 2022. – Vol. 7, iss. 3. – Art. ID 100454. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100454>
15. Kuzhir, P. Microwave absorption by carbon-based materials and structures / P. Kuzhir, A. Celzard, X. Chen // *J. Appl. Phys.* – 2022. – Vol. 131. – Art. ID 200401. <https://doi.org/10.1063/5.0098596>
16. Singh, N. Carbon nanotubes based composites for electromagnetic absorption – a review / N. Singh, G. D. Aul // *Curr. Appl. Mater.* – 2022. – Vol. 1, iss. 1. – Art. ID e050821195213. <https://doi.org/10.2174/2666731201666210803110914>
17. Recent developments in RAM based MWCNT composite materials: a short review / I. V. S. Yeswanth [et al.] // *Funct. Compos. Struct.* – 2022. – Vol. 4, № 2. – Art. ID 024001. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ac5730>
18. Minur, A. Radar absorbing materials: the study of functionalized carbon nanotubes behavior on the attenuation of electromagnetic waves in X-band / A. Minur // *Adv. Polym. Tech.* – 2017. – Vol. 36. – P. 362–370. <https://doi.org/10.1002/ADV.21617>
19. Аяд Хишам Ашур Эль Мокхтар. Порошкообразные углеродсодержащие материалы для электромагнитных экранов / Аяд Хишам Ашур Эль Мокхтар, О. В. Бойправ, Л. М. Лыньков. – Минск: Бестпринт, 2019. – 100 с.
20. Karni, J. Gypsum in construction: origin and properties / J. Karni, E. Karni // *Mater. Struct.* – 1995. – Vol. 28. – P. 92–100. <https://doi.org/10.1007/BF02473176>
21. Development of the broadband multilayer absorption materials with genetic algorithm up to 8 GHz frequency / K. M. Krishna [et al.] // *Security and Communication Networks*. – 2022. – Art. ID 4400412. <https://doi.org/10.1155/2022/4400412>
22. Shukla, V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients / V. Shukla // *Nanoscale Adv.* – 2019. – № 5. – P. 1640–1671. <https://doi.org/10.1039/c9na00108e>

## References

1. Dugin N., Zaboronkova T., Myasnikov E. Using carbon-based composite materials for manufacturing C-range antenna devices. *Latvian Journal of Physics and Technical Sciences*, 2016, vol. 53, iss. 5, pp. 17–23. <https://doi.org/10.1515/lpts-2016-0032>
2. Dugin N. A., Zaboronkova T. M., Krafft C., Belyaev G. R. Carbon-based composite microwave antennas. *Electronics*, 2020, vol. 9, iss. 4, art. ID 590. <https://doi.org/10.3390/electronics9040590>
3. Fionov A., Kraev I., Yurkov G., Solodilov V., Zhukov A., Surgay A., Kuznetsova I., Kolesov V. Radio-absorbing materials based on polymer composites and their application to solving the problems of electromagnetic compatibility. *Polymers*, 2022, vol. 14, iss. 15, art. ID 3026. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
4. Sakharov K. Yu., Turkin V. A., Mikheev O. V., Sukhov A. V., Aleshko A. I. A measuring system for characterization of radar-absorbing materials with sounding ultra-short electromagnetic pulses over the range 0.1–40 GHz. *Conference on Microwave Techniques (COMITE 2015), 22–23 April 2015, Pardubice, Czech Republic. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2015, art. ID 15201605. <https://doi.org/10.1109/COMITE.2015.7120224>*
5. Zhukov P. A., Kirillov V. Yu. The application of radar absorbing materials to reduce interference emissions from instruments and devices of spacecraft electrical systems. *IOP Conference. Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 868, art. ID 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/868/1/012009>

6. Delfini A., Albano M., Vricella A., Santoni F., Rubini G., Pastore R., Marchetti M. Advanced radar absorbing ceramic-based materials for multifunctional applications in space environment. *Materials*, 2018, vol. 11, iss. 9, art. ID 1730. <https://doi.org/10.3390/ma11091730>
7. Mamalis A. G., Enokizono M., Kladas A., Sawada T., Güden M., Demir M. M. Electromagnetic Compatibility Issues in Electric Vehicle Applications. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 915, pp. 71–76. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.915.71>
8. Wu T.-L., Buesink F., Canavero F. Overview of Signal Integrity and EMC Design Technologies on PCB: Fundamentals and Latest Progress. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2013, vol. 55, no. 4, pp. 624–638. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2257796>
9. Deutschmann B., Winkler G., Kastner P. Impact of electromagnetic interference on the functional safety of smart power devices for automotive applications. *Elektrotechnik und Informationstechnik*, 2018, vol. 135, pp. 352–359. <https://doi.org/10.1007/s00502-018-0633-4>
10. Frah M. A. A., Pavlushkina T., Babinova A., Belyaev V. Protection from electromagnetic pollution by using metal based shielding materials. *Journal of Physics Conference Series*, 2021, vol. 2056(1), art. ID 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2056/1/012058>
11. Choudhary A., Pal S., Sarkhel G. Broadband millimeter-wave absorbers: a review. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 2022, first view, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1017/S1759078722000162>
12. Fionov A., Kraev I., Yurkov G., Solodilov V., Zhukov A., Surgay A., Kuznetsova I., Kolesov V. Radio-absorbing materials and technologies for their production. *Polymers*, 2022, vol. 14, art. ID 3026. <https://doi.org/10.3390/polym14153026>
13. Malere C. P. R., Donati B., Eras N., Silva V. A., Lona L. F. Electromagnetic evaluation of radar absorbing materials based on conducting polypyrrole and organic-inorganic nanocomposite of polypyrrole/kaolinite. *Journal of Applied Polymer Science*, 2022, vol. 39, iss. 17, art. ID 52023, <https://doi.org/10.1002/app.52023>
14. Ruiz-Perez F., López-Estrad S. M., Tolentino-Hernández R. V., Caballero-Briones F. Carbon-based radar absorbing materials: A critical review. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, 2022, vol. 7, iss. 3, art. ID 100454. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100454>
15. Kuzhir P., Celzard A., Chen X. Microwave absorption by carbon-based materials and structures. *Journal of Applied Physics*, 2022, vol. 131, art. ID 200401. <https://doi.org/10.1063/5.0098596>
16. Singh N., Aul G. D. Carbon nanotubes based composites for electromagnetic absorption – a review. *Current Applied Materials*, 2022, vol. 1, iss. 1, art. ID e050821195213. <https://doi.org/10.2174/2666731201666210803110914>
17. Yeswanth I. V. S., Jha K., Bhowmik S., Kumar R., Sharma S., Ilyas R. A. Recent developments in RAM based MWCNT composite materials: a short review. *Functional Composites and Structures*, 2022, vol. 4, no. 2, art. ID 024001. <https://doi.org/10.1088/2631-6331/ac5730>
18. Minur A. Radar absorbing materials: the study of functionalized carbon nanotubes behavior on the attenuation of electromagnetic waves in X-band. *Advances in Polymer Technologies*, 2017, vol. 36, pp. 362–370. <https://doi.org/10.1002/ADV.21617>
19. Ayad Hisham Ashoor El Mokhtar, Boiprav O. V., Lynkov L. M. *Powdered Coal-Containing Materials for Electromagnetic Shields*. Minsk, Bestprint Publ., 2019. 100 p. (in Russian).
20. Karni J., Karni E. Gypsum in construction: origin and properties. *Materials and Structures*, 1995, vol. 28, pp. 92–100. <https://doi.org/10.1007/BF02473176>
21. Krishna K. M., Jain A., Kang H. S., Venkatesan M., Shrivastava A., Singh S. K. Development of the broadband multilayer absorption materials with genetic algorithm up to 8GHz frequency. *Security and Communication Networks*, 2022, art. ID 4400412. <https://doi.org/10.1155/2022/4400412>
22. Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*, 2019, no. 5, pp. 1640–1671. <https://doi.org/10.1039/c9na00108e>

## Информация об авторах

*Бойправ Ольга Владимировна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [smu@bsuir.by](mailto:smu@bsuir.by)

*Белюсова Елена Сергеевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [belousova@bsuir.by](mailto:belousova@bsuir.by)

*Бордиловская Даниэла Владиславовна* – студент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [daniela.bordilovskaya@gmail.com](mailto:daniela.bordilovskaya@gmail.com)

## Information about the authors

*Olga V. Boiprav* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [smu@bsuir.by](mailto:smu@bsuir.by)

*Elena S. Belousova* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [belousova@bsuir.by](mailto:belousova@bsuir.by)

*Daniela V. Bordilovskaya* – Student of the Information Protection Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [daniela.bordilovskaya@gmail.com](mailto:daniela.bordilovskaya@gmail.com)

**МАШИНОСТРОЕНИЕ, МЕХАНИКА**  
**MECHANICAL ENGINEERING, MECHANICS**

УДК 621.77:539.375  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-370-378>

Поступила в редакцию 17.08.2022  
Received 17.08.2022

**Г. В. Кожевникова<sup>1</sup>, В. Я. Щукин<sup>2</sup>, С. С. Дубенец<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*  
<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

**КРИТЕРИИ ВСКРЫТИЯ ОСЕВОЙ ПОЛОСТИ  
ПРИ ПОПЕРЕЧНО-КЛИНОВОЙ ПРОКАТКЕ**

**Аннотация.** Рассмотрено применение эмпирической, феноменологической деформационной и энергетической теорий разрушения металла по отношению к процессу поперечно-клиновой прокатки. Отличительной особенностью поперечно-клиновой прокатки по сравнению с другими процессами обработки металлов давлением является сложное напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и возможность вскрытия осевой полости. Приведены существующие эмпирические критерии разрушения. Рассмотрены схема нового калибровочного испытания на основе поперечно-клиновой прокатки и критерий разрушения, предложенные Збигневом Патером. Показано, что эмпирический критерий разрушения Збигнева Патера обеспечивает корректное определение момента вскрытия полости при поперечно-клиновой прокатке. Показано, что согласно феноменологической деформационной теории, разработанной В. Л. Колмогоровым, разрушение металла при пластической деформации наступает после достижения накопленными деформациями своего предельного значения, которое зависит от среднего напряжения. При этом зависимость предельного значения накопленных деформаций от напряжения носит более сложный характер. Предлагается оценивать пластичность металла в зависимости от напряженного состояния в виде двух независимых инвариантов тензора напряжений: среднего напряжения и параметра третьего инварианта тензора напряжений. Зависимость предельной величины накопленной деформации, при которой происходит разрушение, от напряженного состояния строится в виде поверхности пластичности. Феноменологический деформационный критерий разрушения металла при пластических деформациях позволяет определить момент вскрытия полости при поперечно-клиновой прокатке и ресурс пластичности металла.

**Ключевые слова:** пластическое деформирование, критерии разрушения, напряженно-деформированное состояние, пластичность, ресурс пластичности

**Для цитирования:** Кожевникова, Г. В. Критерии вскрытия осевой полости при поперечно-клиновой прокатке / Г. В. Кожевникова, В. Я. Щукин, С. С. Дубенец // Вес. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 370–378. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-370-378>

**Grazhina V. Kozhevnikova<sup>1</sup>, Valery Ya. Shchukin<sup>2</sup>, Stanislav S. Dubianets<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*  
<sup>2</sup>*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

**CRITERIA FOR OPENING AN AXIAL CAVITY IN CROSS-WEDGE ROLLING**

**Abstract.** The application of empirical, phenomenological deformation and energy theories of metal fracture in relation to the process of cross-wedge rolling is considered. A distinctive feature of cross-wedge rolling in comparison with other metal pressure treatment processes is the complex stress-strain state in the deformation focus and the possibility of opening the axial cavity. The existing empirical criteria of destruction are given. The scheme of a new calibration test based on cross-wedge rolling and the fracture criterion proposed by Zbigniew Pater are considered. It is shown that the Zbigniew Pater's empirical criterion for the destruction of Zbigniew Pater provides a correct determination of the moment of opening the cavity during cross-wedge rolling. The improved phenomenological deformation theory is based on the theory of fracture developed by V. L. Kolmogorov. It is proposed to evaluate the plasticity of the metal depending on the stress state in the form of two independent invariants of the stress tensor: the average stress and the parameter of the third invariant of the stress tensor. The dependence of the limit value of accumulated deformation, at which destruction occurs, on the stress state is constructed in the form of a plasticity surface. The phenomenological deformation criterion of metal destruction during plastic deformations allows us to determine the moment of opening the cavity during cross-wedge rolling and the plasticity resource of the metal.

**Keywords:** plastic straining, failure criteria, stress-strain state, plasticity, plasticity resource

**For citation:** Kozhevnikova G. V., Shchukin V. Ya., Dubianets S. S. Criteria for opening an axial cavity in cross-wedge rolling. *Vestsi Natsyunal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 370–378 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-370-378>

**Введение.** В настоящее время при изготовлении валов и осей в условиях массового и крупносерийного производства используются разнообразные способы обработки металлов давлением, которые придают изделиям повышенные механические свойства, обеспечивают высокую производительность труда и экономное использование металла. Особое место среди них занимает поперечно-клиноватая прокатка (ПКП). От других процессов ее выгодно отличает высокий коэффициент использования металла, возможность полной автоматизации процесса, максимальное приближение прокатанной детали к профилю изделия, широкие технологические возможности, высокая стойкость инструмента, низкий уровень шума, отсутствие источников виброколебаний. По экономичности ПКП превосходит штамповку на молотах, прессах, ковочных машинах. В металлообрабатывающей промышленности базирующиеся на использовании метода ПКП технологии используются для производства промежуточных профилированных заготовок под последующую точную штамповку или иные процессы пластического формообразования, а также под чистовую механическую обработку. ПКП используется в автомобильной промышленности, тракторо- и сельхозмашиностроении, станкостроении, горном, дорожном, строительном производствах, приборостроении, энергетическом машиностроении, при производстве бытовой техники, в оборонной промышленности, железнодорожном машиностроении, авиастроении и атомной промышленности.

Основной задачей изучения процессов обработки металлов давлением, как правило, является исследование их кинематики, динамики, изменения свойств материала при пластическом течении и прежде всего – пластических свойств, то есть способности материала изменять свою форму без разрушения. Пластическому разрушению металла всегда предшествуют его пластическая деформация. В исходном состоянии в металле, как правило, присутствуют некоторое количество дислокаций, микротрещин, неметаллических включений и иные дефекты. При пластической деформации происходит рост количества дислокаций, в итоге увеличивается их плотность. При этом вновь образовавшиеся микротрещины и микропоры увеличиваются в размерах. По мере накопления деформаций микропоры и микротрещины, объединяясь, трансформируются в макропоры и макротрещины. На заключительной стадии деформации макропоры и макротрещины перерастают в одну большую макрополость, или макротрещину, что окончательно разрушает материал.

Отличительной особенностью ПКП по сравнению с другими процессами обработки металлов давлением является сложное напряженно-деформированное состояние в очаге деформации [1]. В области контакта заготовки с инструментом наблюдаются сжимающие напряжения и значительные накопленные деформации, в свою очередь в осевой области заготовки отмечаются растягивающее гидростатическое давление и значительные знакопеременные деформации, которые могут привести к разрушению металла в виде осевого вскрытия полости, известного как эффект Маннесмана. В других областях (между контактом и осью заготовки) гидростатическое давление приближается к нулю и накопленные деформации меньше, чем в двух указанных зонах. Указанные ограничения преодолеваются корректным выбором параметров углов инструмента, степени обжатия и температуры прокатки. Геометрия инструмента определяется углом заострения клина  $\beta$  (от  $0,5^\circ$  до  $12^\circ$ ) и углом наклона боковой грани  $\alpha$  (от  $25^\circ$  до  $45^\circ$ ). Угол  $\beta$  определяет скорость распространения очага деформации вдоль оси заготовки, угол  $\alpha$  – площадь контакта заготовки с инструментом и соответственно размеры очага деформации. Заходный участок клина и отрезной нож задаются углом подъема  $\gamma$ .

Вероятность вскрытия осевой полости при ПКП сдерживает широкое применение этого вида прокатки в промышленности. По этой причине большое внимание уделяется изучению процесса разрушения металла при пластических деформациях [2–4].

**Теории разрушения металла.** В теории обработки металлов давлением существует раздел, изучающий разрушение металла при пластических деформациях, который в свою очередь делится на два направления: эмпирическую теорию и феноменологическую деформационную теорию. Третье направление – энергетическую теорию – начинает развивать Белорусская школа поперечной прокатки [5]. Деформационный, энергетический и эмпирический критерии разрушения металлов при пластическом деформировании не противоречат друг другу, но феноменологический деформационный критерий до последнего времени считался наиболее универсальным [1].

Существующие энергетические критерии построены на предположении, что разрушение наступает после совершения определенной работы для конкретного материала. Для зарождения трещины, ее роста и объединения в макрополость необходимо совершить работу, которая постоянна для конкретного материала при стабильной температуре. Существующие энергетические критерии разрушения при пластическом течении имеют ограниченное применение в рамках какого-то одного метода испытания пластических свойств, например растяжения, или растяжения с концентраторами, или поперечной прокатки. В связи с этим данная (энергетическая) теория менее точна и характеризуется ограниченной областью применения. Существующие энергетические теории не учитывают весь тензор напряжений, а только его часть. Для расчета совершенной работы используется произведение только одной из компонент тензора напряжений на накопленную деформацию.

Эмпирическая теория разрушения металла при пластических деформациях предполагает экспериментальное определение зависимости разрушения от параметров процесса. Недостаток этого направления – необходимость постановки эксперимента и требование, с одной стороны, не пропустить все факторы, влияющие на процессы разрушения, а с другой – диапазон экспериментов должен перекрывать диапазон параметров процесса [6].

Феноменологический подход к явлению пластического разрушения металлов – это и не фундаментальная теория, и не эксперимент, хотя он создается с участием эксперимента, поэтому результаты не могут быть описаны научными теориями. Феноменологическая теория определяет взаимосвязь между различными наблюдаемыми явлениями в соответствии с фундаментальной теорией, но непосредственно из этой теории не вытекающими. Теория строится на том, что всякому разрушению должна предшествовать деформация до критической величины. Эта критическая величина деформации в значительной степени зависит от напряженного состояния. На критическую величину деформации оказывает влияние температура деформации, скорость деформации, характер деформации (монотонная и немонотонная) и нелинейность накопления деформации [7].

Обладая информацией о функциональной зависимости критической величины деформации от напряженного состояния в очаге деформации, методом компьютерного моделирования можно просчитать, какой процент пластических свойств металла был израсходован при ПКП. Достижение 100 % означает вскрытие осевой полости. Изменяя геометрию клинового инструмента, расчетным путем возможно оптимизировать его параметры, добиваясь снижения вероятности вскрытия осевой полости. К сожалению, указанная информация, как правило, отсутствует в литературе, и на помощь в этом случае приходит экспериментальный метод определения остаточных пластических свойств в прокатанных поковках, то есть ресурса пластичности.

**Критерий разрушения по Збигневу Патеру.** Эмпирическая теория разрушения при ПКП хорошо освещена в трудах ученых Люблинского университета технологий под руководством профессора Збигнева Патера [4].

Критерий разрушения по Збигневу Патеру  $f_{\text{PATER}}$  [4] записывается следующим образом:

$$f_{\text{PATER}} = \int_0^{\varepsilon_f} \left[ (1 - \Phi) \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_i} + \Phi \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \right] d\varepsilon, \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  – деформация, эквивалентная относительной деформации при растяжении образца в среднем сечении ( $\varepsilon = \Delta l/l$ , здесь  $l$  – длина заготовки,  $\Delta l$  – абсолютное изменение длины);  $\varepsilon_f$  – деформация, при которой происходит разрушение;  $\sigma_1$  – максимальное главное напряжение;  $\sigma_3$  – минимальное главное напряжение;  $\sigma_i$  – эффективное напряжение;  $\Phi$  – функция, описывающая взаимосвязь между напряжением и образованием пустот, их ростом и слиянием:  $\Phi = 0$  при  $\eta \leq 0$ ;  $\Phi = 3\eta$  при  $0 < \eta \leq 0,333$ ;  $\Phi = 1$  при  $\eta > 0,333$  ( $\eta$  – среднее напряжение).

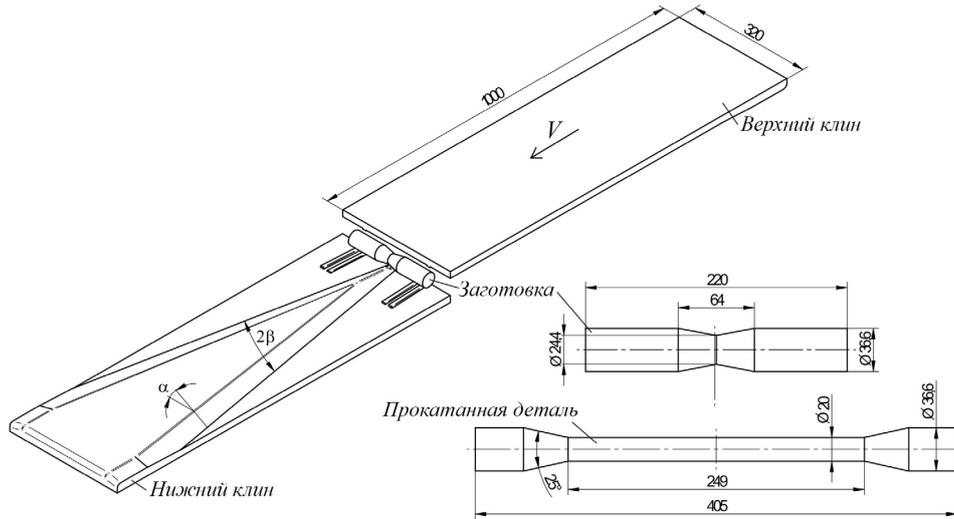


Рис. 1. Схема нового калибровочного испытания на основе поперечно-клиновой прокатки, размеры даны в мм [4]  
 Fig. 1. Schema of a new calibration test based on cross wedge rolling, dimensions in mm [4]

Схема эксперимента по определению пластичности металла по данному критерию показана на рис. 1.

Экспериментально исследовалась пластичность стали 42CrMo4, химический состав которой представлен в таблице.

**Химический состав стали 42CrMo4 по EN 10083-2006**  
**Chemical composition of steel 42CrMo4 according to EN 10083-2006**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0,38–0,45	< 0,4	0,6–0,9	< 0,025	< 0,025	0,9–1,2	0,15–0,30	Остальное

Образцы (см. рис. 1) прокатывались при температурах нагрева 900, 1000, 1100 °С со скоростью инструмента  $V = 300$  мм/с, степень обжатия при прокатке  $\delta$  изменялась плавно от 1,22 до 1,83, углы клинового инструмента задавались следующими: угол заострения клинового инструмента  $\beta = 9^\circ$ , угол наклона боковой грани клинового инструмента  $\alpha$  плавно изменяли от  $21,4^\circ$  до  $12,5^\circ$ . Наличие полости определяли на рентгеновских снимках (рис. 2).

Компьютерным моделированием определялись параметры ПКП за все время прокатки и среди этих данных выделяли значение  $C_i$  для точки  $X_C$  (см. рис. 2). Это значение соответствовало критическому, при котором образовывалась полость. Часть заготовки слева от значения  $X_C$  – это то, что превышало 100 % вскрытия полости, часть заготовки справа от  $X_C$  имела запас пластичности до вскрытия полости.

Затем результаты эксперимента рассчитывались по различным критериям.

Критерий *Rice, Tracey* [8]:

$$f_{RT} = \int_0^\epsilon \exp\left(\frac{2}{3}\eta\right) d\epsilon. \quad (2)$$

Критерий *Ko et al.* [9]:

$$f_{KO} = \int_0^\epsilon \frac{\sigma_1}{\sigma_i} ((1 + 3\eta)) d\epsilon. \quad (3)$$

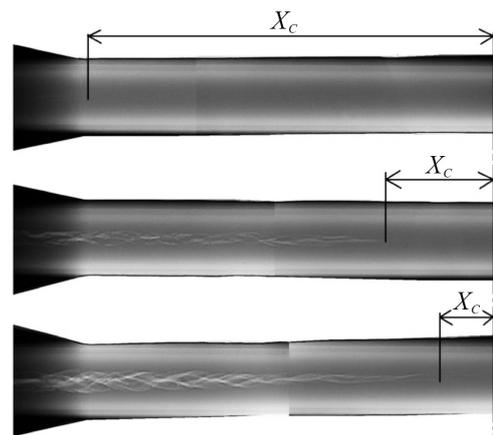


Рис. 2. Рентгеновские снимки образцов стали 42CrMo4, прокатанных из заготовок, предварительно нагретых до (сверху вниз) 1100, 1000 и 900 °С [4]

Fig. 2. Radiograms of 42CrMo4 steel specimens rolled from billets preheated to (from top to bottom) 1100, 1000 and 900 °C [4]

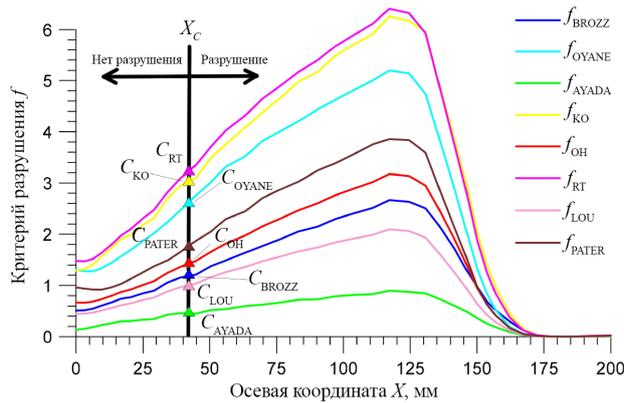


Рис. 3. Безразмерные функции поврежденности в осевой зоне образца при испытании методом поперечно-клиновой прокатки при 1000 °С (осевая координата  $X = 0$  мм обозначает плоскость симметрии) [4]

Fig. 3. Dimensionless damage functions in the axial zone of the sample when tested on the basis of cross-wedge rolling at 1000 °C (the axial coordinate  $X = 0$  mm denotes symmetry plane) [4]

Критерий *Oyane* [10]:

$$f_{OYANE} = \int_0^\varepsilon (1 + A\eta) d\varepsilon, \tag{4}$$

где  $A$  – константа материала.

Критерий *Oh et al.* [11]:

$$f_{OH} = \int_0^\varepsilon \frac{\sigma_1}{\sigma_i} d\varepsilon. \tag{5}$$

Критерий *Brozzo et al.* [12]:

$$f_{BROZZO} = \int_0^\varepsilon \frac{2\sigma_1}{3(\sigma_i - \sigma_m)} d\varepsilon. \tag{6}$$

Критерий *Lou et al.* [13]:

$$f_{LOU} = \int_0^\varepsilon \left( \frac{\tau_{\max}}{\sigma_i} \right)^{c_1} \left( \frac{\langle 1 + 3\eta \rangle}{2} \right)^{c_2} d\varepsilon, \tag{7}$$

где  $\tau_{\max}$  – максимальное напряжение сдвига.

Критерий *Ayada et al.* [14]:

$$f_{AYADA} = \int_0^\varepsilon \eta d\varepsilon. \tag{8}$$

Результаты эксперимента, рассчитанные по критериям (1)–(8), показаны на рис. 3.

Критерии (1)–(8) квалифицируются как эмпирические, так как они не отражают зависимости разрушения металла от параметров ПКП, влияющих на разрушение: напряженное состояние ( $\sigma/K$ ;  $\sqrt[3]{J_3(D_\sigma)}/K$ ), вид деформации, скорость деформации. Во всех критериях (1)–(8) тензор напряжений (а это шесть компонент тензора и дополнительно его ориентация относительно очага деформации) заменяется отдельными компонентами тензора напряжений:  $\sigma_1$  и  $\sigma_3$ . Подобная замена не противоречит эмпирической теории разрушения, которая допускает устанавливать зависимость разрушения от любых выбранных параметров процесса. Точность каждого эмпирического критерия (1)–(8) будет зависеть, кроме всего прочего, от марки материала, поэтому данный фактор должен оцениваться при проведении экспериментов.

Исходя из предположения, что разрушение металла  $w_i$  линейно связано с критерием разрушения  $C_i$ , Збигнев Патер определил его значение по формуле

$$w_i = 100\% \frac{f}{C_i}. \tag{9}$$

Доказательство закономерности (9) в [4, 15] не приводится.

Условия обозначения в формулах (1)–(8) отличаются от применяемых в Беларуси, поэтому следует иметь в виду следующее:

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_i} = \frac{\sigma}{K}; \quad (10)$$

$$\Theta = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \left[ \left( \frac{r}{\sigma_i} \right)^3 \right] = 1 - \frac{2}{\pi} \arccos \frac{I_3(D_\sigma)}{K^3} \cdot 13,5; \quad (11)$$

$$r = \left[ \frac{27}{2} (\sigma_1 - \sigma)(\sigma_2 - \sigma)(\sigma_3 - \sigma) \right]^{\frac{1}{3}} = 2,38 \cdot \sqrt[3]{I_3(D_\sigma)}, \quad (12)$$

где  $\sigma_m = \sigma$  – среднее напряжение;  $\Theta$  – параметр угла Лоде;  $r$  – корень кубический из третьего инварианта девиатора напряжений;  $I_3(D_\sigma)$  – третий инвариант девиатора напряжений;  $K$  – пластическая постоянная материала.

Зависимость (9) показывает, что описанный экспериментальный метод определения (см. рис. 2, 3) дает достоверную информацию только для одного значения  $X_C$ , когда параметры ПКП просчитаны на компьютере и эксперимент показал момент вскрытия полости  $C_i$ . Исследователей в значительно большей степени интересуют моменты прокатки до вскрытия полости, то есть для случая  $X < X_C$ . В этой области эксперимент дает недостоверный результат по следующим причинам.

1. В области  $X < X_C$  в эксперименте считается, что все значения критерия разрушения равны  $C = C_i$ . Реально это не выполняется, потому что в данной области прокатка проходит со степенью обжатия  $\delta < \delta_C$  и углом наклона боковой грани  $\alpha < \alpha_C$ . Несомненно, что выбор других параметров прокатки  $\delta$  и  $\alpha$  приводят к изменению значений критериев разрушения  $C$  и  $w_i$ .

2. Нами показано [7, 16], что на разрушение оказывают влияние два параметра напряженного состояния – скорость деформации (в большей степени для цветных сплавов) и вид деформации: монотонная однонаправленная, немонотонная однонаправленная и немонотонная разнонаправленная. Эмпирический критерий (1) эти закономерности не учитывает.

**Критерий разрушения деформационной феноменологической теории.** Усовершенствованная феноменологическая деформационная теория [7] строится на базе разработанной В. Л. Колмогоровым [17] теории разрушения. Согласно феноменологической деформационной теории разрушение металла при пластической деформации наступает после достижения накопленными деформациями своего предельного значения  $\Lambda_{пр}$ . Это предельное значение зависит от среднего напряжения  $\sigma/K$ , и эта зависимость названа диаграммой пластичности. Предельное значение накопленных деформаций  $\Lambda_{пр}$  также зависит от температуры и скорости деформации. Повреждаемость металла нелинейно связана с накопленными деформациями. Авторами в значительной степени развита теория В. Л. Колмогорова и показана зависимость показателя нелинейности накопления повреждаемости от напряженного состояния и его порогового значения. Показано [7], что зависимость предельного значения накопленных деформаций  $\Lambda_{пр}$  от напряжений носит более сложный характер: она представляет собой поверхность пластичности. Впервые предлагается оценивать пластичность металла в зависимости от напряженного состояния в виде двух независимых инвариантов тензора напряжений: среднего напряжения и параметра третьего инварианта тензора напряжений. Зависимость предельной величины накопленной деформации  $\Lambda_{пр}$ , при которой происходит разрушение, от напряженного состояния, строится в виде поверхности пластичности 1–2–3–4 (рис. 4):

$$\Lambda_{пр} = f(\sigma/K; \sqrt[3]{J_3(T_\sigma)} / K), \quad (13)$$

где  $\sigma/K$  – среднее напряжение;  $\sigma$  – среднее нормальное напряжение, Па;  $K$  – пластическая постоянная материала, Па;  $\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)} / K$  – параметр третьего инварианта тензора напряжений;  $J_3(T_\sigma)$  – третий инвариант тензора напряжений, Па<sup>3</sup>.

Использование в выражении (13) первого  $J_1(T_\sigma)$  и третьего  $J_3(T_\sigma)$  инвариантов тензора напряжений определяет их взаимную независимость, а деление на  $K$  позволяет сравнивать между собой пластичность различных материалов.

Согласно феноменологической деформационной теории разрушения металла, при пластических деформациях напряженное состояние описывается тензором напряжений в главных осях тремя параметрами  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ , в этом случае три касательных напряжения равны нулю. Из трех

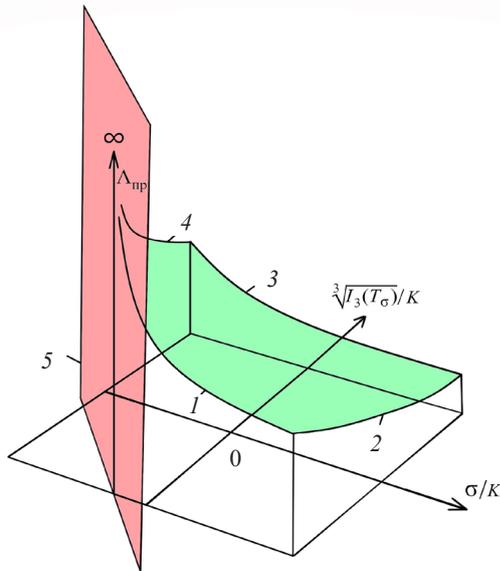


Рис. 4. Зависимость предельной степени деформации сдвига  $\Lambda_{пр}$  от параметров напряженного состояния: среднего напряжения  $\sigma/K$  и параметра третьего инварианта тензора напряжений  $\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)}/K$ ; 1–2–3–4 – поверхность пластичности [16]  
 Fig. 4. Dependence of the limiting degree of shear deformation  $\Lambda_{пр}$  on the parameters of the stress state: the average stress  $\sigma/K$  and the parameter of the third invariant of the stress tensor  $\sqrt[3]{J_3(T_\sigma)}/K$ ; 1–2–3–4 – plasticity surface [16]

главных нормальных напряжений независимыми являются только два, так как третье главное нормальное напряжение связано с остальными двумя условием пластичности Мизеса

$$K = +\sqrt{\frac{1}{6}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}. \quad (14)$$

Поэтому зависимость накопленной до разрушения деформации при условии несжимаемости материала равна

$$\Lambda_{пр} = +\sqrt{\frac{1}{6}[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]}. \quad (15)$$

Критерий разрушения в данной теории разрушения записывается в виде:

$$\Lambda = \int_0^t H dt = \Lambda_{пр}, \quad (16)$$

где  $H$  – интенсивность скоростей деформации сдвига,  $c^{-1}$ ;  $t$  – время, с.

Закономерность (16) представлена на рис. 4 поверхности 1–2–3–4 предельных значений степени деформации сдвига  $\Lambda_{пр}$ . Отметим закономерность: кривые 1 и 3 – это диаграммы пластичности феноменологической деформационной теории В. Л. Колмогорова [17]. Данное обстоятельство подчеркивает, что усовершенствованная авторами настоящей статьи теория разрушения является развитием известной теории В. Л. Колмогорова.

Наиболее простой аппроксимирующей функцией кривых поверхности пластичности является

$$\Lambda_{пр} = \frac{A}{1 + B(\sigma/K)_\infty}. \quad (17)$$

Для экспериментального определения зависимости (17) достаточно двух испытаний с различными напряжениями, что сокращает количество экспериментов для построения поверхности пластичности. При  $(\sigma/K)_\infty = -\frac{1}{B}$  предельная степень деформации сдвига стремится к бесконечности  $\Lambda_{пр} = \infty$ , то есть разрушение материала невозможно, при этом наблюдается (в том числе экспериментально) эффект неограниченной пластичности – область 5 на рис. 4.

Наличие в феноменологической деформационной теории трех видов деформации с различными уровнями предельной степени деформации сдвига является следствием зависимости уровня повреждаемости металла от возможного направления линий дислокаций. Математически эта зависимость записывается следующим образом:

$$\Lambda_i^{\Omega_1} = \Lambda_{i+1}; \quad (18)$$

$$\Lambda_{i+1}^{\Omega_2} = \Lambda_{i+2}. \quad (19)$$

Здесь  $\Lambda_i^{\Omega_1}, \Lambda_{i+1}^{\Omega_2}, \Lambda_{i+2}$  – предельные степени деформации сдвига видов, где  $\Omega_1 > \Omega_2 > 1$ .

Поскольку количественная величина пластичности материала зависит от вида деформации, методы экспериментального определения пластичности также следует разделить на ряд подгрупп в соответствии с видами деформации: однонаправленная монотонная, разнонаправленная монотонная и разнонаправленная немонотонная.

*Однонаправленная монотонная деформация:* кручение цилиндрической заготовки или трубы в одном направлении; сдвиг образца в одном направлении; метод ЕСАР с одноразовым продавливанием образца; растяжение листового крестообразного образца (3D); гибка листа.

*Разнааправленая монатонная дэфармацыя:* растяжэнне цыліндрычнага образца без абразавання шэйкі; асадка цыліндрычнага образца без абразавання бочки; растяжэнне ліста без абразавання шэйкі; сдвиг образца в одной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям; растяжэнне цыліндрычнага образца с адначасным кручэннем без абразавання шэйкі; асадка цыліндрычнага образца с адначасным кручэннем без абразавання бочки.

*Разнааправленая немонатонная дэфармацыя:* кручэнне цыліндрычнага образца или трубы в режиме с изменением знака деформации на противоположный; метод ЕСАР с изменением знака деформации на противоположный; растяжэнне цыліндрычнага образца с канцэнтратаром; растяжэнне ліста с канцэнтратаром; папярэчная прокатка при плоско-деформированном состоянии (2D); папярэчная прокатка дыскообразнага образца (3D), – методы испытання пластычнасці металлов, при которых могут использоваться знакопеременные деформации, изменяется напряженное состояние вдоль линии тока.

В феноменологической деформационной теории ресурс пластичности  $\lambda$  (остаточная пластичность) определяется для первого вида деформации по формуле

$$\lambda = \left( 1 - \frac{\Lambda}{\Lambda_{\text{пр}}} \right) \cdot 100\% \quad (20)$$

и является постоянной величиной с изменением параметров деформирования.

**Заклучение.** Таким образом, установлено, что эмпирический критерий разрушения Збигнева Патера обеспечивает корректное определение момента вскрытия полости при ПКП. Феноменологический деформационный критерий разрушения металла при пластических деформациях дает возможность установить момент вскрытия полости при ПКП и ресурс пластичности металла.

Полученный результат показывает области применения эмпирических и феноменологического деформационного критериев разрушения металла применительно к процессу ПКП и позволяет обоснованно выбирать критерий разрушения в зависимости от задач, стоящих перед исследователем.

#### Список использованных источников

1. Щукин, В. Я. Белорусская школа поперечно-клиновой прокатки / В. Я. Щукин, Г. В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 1. – С. 43–50.
2. A study on central crack formation in cross wedge rolling / Xianyan Zhoua [et al.] // J. Mater. Process. Tech. – 2020. – Vol. 279. – Art. ID 116449. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116549>
3. Cuiping Yang. Micro-mechanism of central damage formation during cross wedge rolling / Cuiping Yang, H. Dong, Zhenghuan Hu // J. Mater. Process. Technol. – 2018. – Vol. 252. – P. 322–332. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.041>
4. Pater, Z. Establishment of a new hybrid fracture criterion for cross wedge rolling / Z. Pater, J. Tomczak, T. Bulzak // Int. J. Mech. Sci. – 2020. – Vol. 167. – Art. ID e105274. <https://doi.org/10.1016/j.jmesci.2019.105274>
5. Кожевникова, Г. В. Развитие энергетической теории разрушения при пластической деформации металла / Г. В. Кожевникова, С. С. Дубенец // Актуальные проблемы прочности / А. В. Алифанов [и др.]; под ред. В. В. Рубаника. – Минск: УП «ИВЦ Минфина», 2022. – Гл. 13. – С. 160–172.
6. Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure / M. Çakırcalı [et al.] // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2013. – Vol. 65, iss. 9–12. – P. 1273–1287. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4256-3>
7. Кожевникова, Г. В. Деформационный критерий разрушения при пластическом течении / Г. В. Кожевникова // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2010. – № 2. – С. 61–68.
8. Rice, J. R. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields / J. R. Rice, D. M. Tracey // J. Mech. Phys. Solids. – 1969. – Vol. 17, iss. 3. – P. 201–217. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(69\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(69)90033-7)
9. Prediction of fracture in hub-hole expanding process using a new ductile fracture criterion / Y. K. Ko [et al.] // J. Mater. Process. TechnOL. – 2007. – Vol. 187–188. – P. 358–362. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.jmatprotec.2006.11.071>
10. Oyane, M. Criteria of Ductile Fracture Strain / M. Oyane // Bull. of JSME. – 1972. – Vol. 15, iss. 90. – P. 1507–1513. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.15.1507>
11. Oh, S. I. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part II. Workability in extrusion and drawing / S. I. Oh, C. C. Chen, S. Kobayashi // J. Eng. Ind. – 1979. – Vol. 101, iss. 1. – P. 36–44. <https://doi.org/10.1115/1.3439471>
12. Brozzo, P. A new method for the prediction of formability limits in metal sheets / P. Brozzo, B. Deluca, R. Rendina // Sheet metal forming and formability: 7<sup>th</sup> Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group' 72: [Proceedings] : Amsterdam, October 9–13, 1972. – [Amsterdam, 1972].
13. Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes / M. Zhan [et al.] // Comp. Mater. Sci. – 2009. – Vol. 47, iss. 2. – P. 353–365. <http://dx.doi.org/10.1016%2Fj.commatsci.2009.08.011>
14. Ayada, M. Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials / M. Ayada, T. Higashino, K. Mori // Proc. of the First Intern. Conf. on Technology of Plasticity, Tokyo, Japan, 3–7 September 1984. – P. 553–558.
15. Determination of the Critical Value of Material Damage in a Cross Wedge Rolling Test / Z. Pater [et al.] // Materials. – 2021. – Vol 14, № e1586. – P. 1–18. <http://dx.doi.org/10.3390/ma14071586>

16. Кожевникова, Г. В. Пластические свойства металлов и сплавов: феноменологическая деформационная теория разрушения при пластическом течении / Г. В. Кожевникова, В. Я. Щукин. – Минск: Беларус. навука, 2021. – 277 с.
17. Пластичность и разрушение / под общ. ред. В. Л. Колмогорова. – М.: Металлургия, 1977. – 336 с.

## References

1. Shchukin V. Ya., Kozhevnikova G. V. Belarusian cross-wedge rolling school of thought. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 1, pp. 43–50 (in Russian).
2. Xianyan Zhoua, Zhutao Shaoa, Pruncua C. I., Lin Huab, Balinta D., Jianguo Lina, Jun Jianga. A study on central crack formation in cross wedge rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2020, vol. 279, art. ID 116449. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116549>
3. Cuiping Yang, Dong H., Zhenghuan Hu. Micro-mechanism of central damage formation during cross wedge rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, vol. 252, pp. 322–332. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.09.041>
4. Pater Z., Tomczak J., Bulzak T. Establishment of a new hybrid fracture criterion for cross wedge rolling. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2020, vol. 167, art. ID e105274. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105274>
5. Kozhevnikova G. V., Dubenets S. S. Development of the energy theory of fracture during plastic deformation of a metal. Rubanik V. V. (ed.) *Actual Problems of Strength*. Minsk, UE “ECM of the Ministry of Finance”, 2022, ch. 13, pp. 160–172.
6. Çakırcalı M., Kılıçaslan C., Güden M., Kiranlı E., Shchukin V. Y., Petronko V. V. Cross wedge rolling of a Ti6Al4V (ELI) alloy: the experimental studies and the finite element simulation of the deformation and failure. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 65, iss. 9–12, pp. 1273–1287. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4256-3>
7. Kozhevnikova G. V. Deformation criterion of fracture in plastic flow. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2010, no. 2, pp. 61–68 (in Russian).
8. Rice J. R., Tracey D. M. On the ductile enlargement of voids in triaxial stress fields. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1969, vol. 17, iss. 3, pp. 201–217. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(69\)90033-7](https://doi.org/10.1016/0022-5096(69)90033-7)
9. Ko Y. K., Lee J. S., Huh H., Kim K. K., Park S. H. Prediction of fracture in hub-hole expanding process using a new ductile fracture criterion. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 187–188, pp. 358–362. <http://doi.org/10.1016%2Fj.jmatprotec.2006.11.071>
10. Oyane M. Criteria of Ductile Fracture Strain. *Bulletin of JSME*, 1972, vol. 15, iss. 90, pp. 1507–1513. <https://doi.org/10.1299/jsme1958.15.1507>
11. Oh S. I., Chen C. C., Kobayashi S. Ductile fracture in axisymmetric extrusion and drawing. Part II. Workability in extrusion and drawing. *Journal of Engineering for Industry*, 1979, vol. 101, iss. 1, pp. 36–44. <https://doi.org/10.1115/1.3439471>
12. Brozzo P., Deluca B., Rendina R. A new method for the prediction of formability limits in metal sheets. *Sheet metal forming and formability: 7<sup>th</sup> Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group' 72: [Proceedings]: Amsterdam, October 9–13, 1972*. Amsterdam, 1972.
13. Zhan M., Gu C., Jiang Z., Hu L., Yang H. Application of ductile fracture criteria in spin-forming and tube-bending processes. *Computational Materials Science*, 2009, vol. 47, iss. 2, pp. 353–365. <http://doi.org/10.1016%2Fj.commatsci.2009.08.011>
14. Ayada M., Higashino T., Mori K. Central bursting in extrusion of inhomogeneous materials. *Proceedings of the First International Conference on Technology of Plasticity, Tokyo, Japan, 3–7 September 1984*, pp. 553–558.
15. Pater Z., Gontarz A., Tomczak J., Bulzak T. Determination of the Critical Value of Material Damage in a Cross Wedge Rolling Test. *Materials*, 2021, vol. 14, no. e1586, pp. 1–18. <http://doi.org/10.3390/ma14071586>
16. Kozhevnikova G., Shchukin V. *Plastic Properties of Metals and Alloys: Phenomenological Deformation Theory of Destruction in Plastic Flow*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2021. 277 p. (in Russian).
17. Kolmogorov V. L. (ed.) *Plasticity and Destruction*. Moscow, Metallurgia Publ., 1977. 336 p. (in Russian).

## Информация об авторах

Кожевникова Гражина Валерьевна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории точной штамповки и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fti@tut.by

Щукин Валерий Яковлевич – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник, Республиканское инновационное унитарное предприятие «Научно-технологический парк БНТУ «Политехник» (ул. Я. Коласа, 24, 220131, Минск, Республика Беларусь). E-mail: fti@tut.by

Дубенец Станислав Сергеевич – младший научный сотрудник лаборатории точной штамповки и поперечно-клиновой прокатки, Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси (ул. Академика Купревича, 10, 220141, Минск, Республика Беларусь). E-mail: dubenetsss@gmail.com

## Information about the authors

Grazhina V. Kozhevnikova – Dr. Sc. (Engineering), Chief Researcher of the Laboratory of Close Tolerance Forging and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fti@tut.by

Valery Ya. Shchukin – Ph. D (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher “Science and Technology Park BNTU “Polytechnic”, the Belarusian National Technical University (24, Ya. Kolas Str., 220131, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: fti@tut.by

Stanislav S. Dubianets – Junior Researcher of the Laboratory of Close Tolerance Forging and Cross-Wedge Rolling, Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus (10, Academician Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: dubenetsss@gmail.com

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

УДК 549.7+662.756

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-379-392>

Поступила в редакцию 24.02.2022

Received 24.02.2022

**М. В. Малько<sup>1</sup>, К. В. Доброго<sup>2</sup>, С. В. Василевич<sup>3</sup>, Д. В. Дегтеров<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь*<sup>2</sup>*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*<sup>3</sup>*Белорусская государственная академия авиации, Минск, Республика Беларусь***КАТАЛИТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА НЕКОТОРЫХ МИНЕРАЛЬНЫХ СОЛЕЙ  
ПО ОТНОШЕНИЮ К ПРОЦЕССУ РАЗЛОЖЕНИЯ ПИРОЛИТИЧЕСКОЙ СМОЛЫ**

**Аннотация.** Обсуждаются результаты экспериментального исследования термического разложения древесной пиролизической смолы в гомогенном процессе, а также в присутствии ряда минеральных веществ: сульфата калия, сульфата магния, монокалийфосфата и минерального остатка производства калийных солей (МОКС). Опыты выполнены на лабораторной установке в изотермических условиях при температурах 300, 350 и 400 °С по двум методам, обеспечивающим двухфазный и трехфазный контакт с катализатором соответственно. Установлено, что скорость разложения пиролизической смолы в изученных условиях подчиняется закономерностям, описываемым уравнением Аврамы–Ерофеева с переменным показателем  $n$ . Область изменения этого показателя в различных опытах включает величины от 0,415 до 1,238. Среднее значение показателя  $n$ , рассчитанное по всем вариантам исследования, составило 0,694 (95 % ДИ от 0,605 до 0,783), а медианное значение – 0,639. Обнаружено, что скорость разложения пиролизической смолы возрастает в случае внесения в реакционную зону частиц МОКС, сульфата калия и сульфата магния. Не было обнаружено влияния монокалийфосфата на скорость разложения литической смолы. Показано, что в случае присутствия в процессе МОКС увеличение скорости разложения (убыли) пиролизической смолы обусловлено каталитическим эффектом этого вещества. Наиболее вероятной причиной положительного влияния сульфата калия, а также сульфата магния на скорость разложения пиролизической смолы, по-видимому, также является каталитическое воздействие этих веществ. Определены Аррениусовские параметры гомогенного процесса термического разложения смолы и процесса разложения в присутствии МОКС, а также сульфатов калия и магния. Согласно полученным данным, энергия активации гомогенного процесса составила 29,6 кДж/моль, а предэкспоненциальный фактор –  $3,15 \cdot 10^1 \text{ мин}^{-1}$  соответственно. Аррениусовские параметры разложения пиролизической смолы в присутствии МОКС по данным выполненных исследований составили 23,0 кДж/моль и  $1,82 \cdot 10^1 \text{ мин}^{-1}$ . Определены Аррениусовские параметры разложения пиролизической смолы в присутствии  $\text{K}_2\text{SO}_4$  и  $\text{MgSO}_4$ . В соответствии с оценками энергия активации в присутствии этих веществ составила порядка 50–60 кДж/моль. Представленные в статье результаты исследований могут быть использованы при проектировании теплогенерирующего оборудования, включающего в себя систему очистки продуктов термохимической конверсии растительного сырья.

**Ключевые слова:** пиролизные смолы, сульфат калия, сульфат магния, монокалийфосфат, минеральный остаток калийного производства, кинетика разложения, энергия активации, предэкспоненциальный фактор

**Для цитирования:** Каталитические свойства некоторых минеральных солей по отношению к процессу разложения пиролизической смолы / М. В. Малько [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 379–392. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-379-392>

**Mikhail V. Malko<sup>1</sup>, Kirill V. Dobrego<sup>2</sup>, Siarhei V. Vasilevich<sup>3</sup>, Dmitry V. Degterov<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus*<sup>2</sup>*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*<sup>3</sup>*Belarusian State Aviation Academy, Minsk, Republic of Belarus***CATALYTIC PROPERTIES OF SOME MINERAL SALTS IN RELATION  
TO THE PROCESS OF DECOMPOSITION OF PYROLYSIS TAR**

**Abstract.** The paper discusses the results of an experimental study of the thermal decomposition of pyrolytic wood tar in a homogeneous process, as well as in the presence of a number of mineral substances: potassium sulfate, magnesium sulfate, monopotassium phosphate and the mineral residue of the production of potassium salts. The experiments were carried out on

a laboratory setup under isothermal conditions at temperatures of 300, 350, and 400 °C by two methods providing two-phase and three-phase contact with the catalyst, respectively. It has been established that the rate of decomposition of pyrolysis tar under the studied conditions obeys the laws described by the Avrami–Erofeev equation with a variable exponent  $n$ . The area of change of this indicator in various experiments includes values from 0.415 to 1.238. The mean  $n$  value calculated for all study options was 0.694 (95 % CI 0.605 to 0.783), and the median value was 0.639. It has been found that the decomposition rate of the pyrolysis tar increases when MOX particles, potassium sulfate, and magnesium sulfate are introduced into the reaction zone. No effect of monopotassium phosphate on the rate of decomposition of the pyrolysis tar was not found. It is shown that in the case of tailings of potassium salts production an increase in the rate of decomposition of pyrolysis tar is due to the catalytic effect of this substance. The most likely reason for the positive effect of potassium sulfate, as well as magnesium sulfate on the rate of decomposition of pyrolysis tar, is apparently also the catalytic effect of these substances. The Arrhenius parameters of the homogeneous process of thermal decomposition of the pyrolysis tar and the decomposition process in the presence of tailings of potassium salts production, as well as potassium and magnesium sulfates, were determined. According to the data obtained, the activation energy of the homogeneous process was 29.6 kJ/mol, and the pre-exponential factor was  $3.15 \cdot 10^1 \text{ min}^{-1}$ , respectively. The Arrhenius parameters of the decomposition of pyrolysis tar in the presence of tailings of potassium salts production, according to the data of the performed studies, were 23.0 kJ/mol and  $1.82 \cdot 10^1 \text{ min}^{-1}$ . The paper also determined the Arrhenius parameters of the decomposition of pyrolysis tar in the presence of  $\text{K}_2\text{SO}_4$  and  $\text{MgSO}_4$ . According to estimates, the activation energy in the presence of these substances was about 50–60 kJ/mol. The research results presented in the article can be used in the design of heat generating equipment, which includes a system for cleaning products of thermochemical conversion of vegetable raw materials.

**Keywords:** pyrolysis tar, potassium sulfate, magnesium sulfate, monopotassium phosphate, potash production waste, decomposition kinetics, activation energy, pre-exponential factor

**For citation:** Malko M. V., Dobrego K. V., Vasilevich S. V., Degterov D. V. Catalytic properties of some mineral salts in relation to the process of decomposition of pyrolysis tar. *Vestsi Natsyynal'най akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 379–392 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-379-392>

**Введение.** Исследования диверсификации энергоресурсов, в том числе за счет использования новых видов топлива и/или улучшения характеристик традиционных топлив, представляют значительный интерес для энергетики. Перспективным направлением исследований и разработок этих вопросов является развитие тепловых электростанций относительно небольшой мощности, использующих различные виды местного топлива [1–3]. Такие объекты малой энергетики, как правило, ориентируются на получение генераторного газа, а не на непосредственное сжигание топлива [3–5]. При этом их эффективность существенно ограничивается несовершенством процесса очистки от смол и охлаждения генераторного газа. По данным [3, 4] стоимость аппаратов кондиционирования генераторного газа, получаемого из местных видов топлива, составляет до 15–20 % от общей стоимости строительства теплоэлектростанций с парогазовыми установками.

Необходимость использования систем очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и материалов органического происхождения обусловлена образованием в таких процессах органических веществ, образующих пиролизную смолу. В состав пиролитической смолы, как известно, входят различные полициклические соединения, имеющие низкую точку росы. Они отлагаются на поверхностях с температурой ниже точки росы [5]. Это приводит к забивке фильтров и арматуры на линии перекачки смеси, которая образовалась в процессе термохимической конверсии вещества, что может спровоцировать остановку всего рабочего процесса. Возможным путем решения этой проблемы является использование катализаторов, обеспечивающих ускоренный процесс разложения пиролизных смол при температурах порядка 700–800 °C. Применение каталитического метода очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и отходов биологического происхождения не требует дополнительного подогрева для разложения нежелательных продуктов конверсии с целью повышения скорости гомогенных процессов разложения этих продуктов. Это является преимуществом каталитической очистки продуктов термохимической конверсии биомассы и материалов органического происхождения по сравнению с гомогенными процессами [6]. Результаты исследований, посвященных применению катализаторов в специфических термохимических процессах, таких как термическое разложение смол, образующихся в процессе пиролиза биомассы, обсуждаются, в частности, в [7–9].

К настоящему времени выполнено большое количество работ по катализу в нефтехимии, окислительному катализу. Установлены достаточно четкие представления о механизмах катализа, структуре и составу оптимальных катализаторов (например, работы Института катализа им. Г. К. Борескова Сибирского отделения Российской академии наук) [10]. Следует отметить, что для малых энергетических технологий, для местной промышленности Беларуси (а именно

они находятся в фокусе настоящего исследования) важным фактором является дешевизна и доступность каталитических материалов. И здесь открывается широкое поле для поиска и исследования доступных минеральных материалов. Безусловно, первая стадия исследований должна включать экспериментальное тестирование разнообразных минеральных материалов с целью выявления их каталитических свойств.

В [11–14] исследованы каталитические свойства доломита. Анализ данных [12, 13] показал, что хотя доломит по своим каталитическим свойствам не уступает таким катализаторам разложения углеводородов, как Ni, Ru, Rh, Pt, однако он имеет существенный недостаток – понижение механических свойств при нагреве, что приводит к сильной эрозии и снижению каталитической активности.

В настоящей работе приведены результаты экспериментального исследования некоторых минеральных материалов, доступность которых обусловлена их применением в крупнотоннажном производстве для сельскохозяйственных целей. Это соли, входящие в состав минеральных удобрений: сульфат калия, сульфат магния, монокалийфосфат, а также минеральные остатки производства калийных солей (МОКС).

*Цель исследования* – определение каталитической активности входящих в состав минеральных удобрений солей: сульфата калия, сульфата магния, монокалийфосфата, а также минеральных остатков производства калийных солей (МОКС) по отношению к процессу термического разложения пиролитической смолы, образующейся в термохимической конверсии древесной биомассы.

**Методика исследования.** Изучение термохимических, в том числе каталитических, процессов могут быть проведено как в изотермических, так и в неизотермических условиях. В настоящей работе приведены результаты экспериментов, выполненных в изотермических условиях. Такой выбор условий обусловлен тем, что указанные условия позволяют сократить число показателей, подлежащих определению. Это упрощает анализ получаемых экспериментальных данных, что в итоге приводит к более точному установлению кинетических параметров термохимического процесса.

Используемые в исследовании сульфат магния и монокалийфосфата представляют собой удобрение, выпускаемое ОАО «Буйский химический завод» (Российская Федерация). Сульфат калия – минеральное удобрение, производимое в ОАО «Белреахим» (Республика Беларусь).

МОКС получены на четвертом руднике ОАО «Беларускалий» (Республика Беларусь) и представляют собой дисперсный материал с размером фракций 1–3 мм. В табл. 1 приведен элементный состав МОКС, установленный с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN MIRA 3 LMN (Чешская Республика).

Т а б л и ц а 1. Элементный состав МОКС  
Table 1. Elemental composition of tailings of potassium salts production

Показатель	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Br
Макс, %	15,08	5,94	34,41	0,78	0,62	2,54	0,29	56,94	44,61	4,74	2,60	0,42
Мин, %	3,72	2,12	3,80	0,58	0,09	0,27	0,29	43,42	0,47	0,93	2,60	0,42
Средний, %	–	4,18	19,78	–	–	–	–	52,78	13,67	–	–	–
Стандартное отклонение, %	–	1,60	13,32	–	–	–	–	6,33	20,84	–	–	–

Каталитические свойства указанных минеральных веществ были изучены в процессе разложения жидкой пиролитической смолы, образовавшейся в процессе термохимической конверсии при температуре 600 °С березовой щепы и последующего быстрого охлаждения полученного продукта до 200 °С.

Плотность полученной смолы составила 0,9 г/см<sup>3</sup>, вязкость – 395 ± 4 сСт. Вязкость определяли на ротационном вискозиметре Brookfield DV2T (США) при температуре 17,1 °С. Температура вспышки фиксировалась с помощью автоматического аппарата ТВЗ-ЛАБ-11 (Российская Федерация) и составила 190 °С. Теплотворная способность смолы, которая определялась на калориметре В-08МА«К» (Российская Федерация), равнялась 28766,78 кДж/кг (6870,83 кКал/кг).

Скорость термического гомогенного разложения пиролитической смолы устанавливалась следующим образом. Образец смолы массой около 2 г наливался в лабораторную керамическую емкость и помещался в печь SNOL7,2/1300 (ОАО «Умега», Российская Федерация), позволяющую поддерживать постоянную температуру среды до 1300 °С с точностью  $\pm 2$  °С. Образцы смол выдерживались при заданной постоянной температуре. После выдержки в течение установленного периода времени кювета извлекалась из печи и взвешивалась на электронных весах Pioneer PA214C 210/0.1mg (OHAUS Corporation, США) с дискретностью 0,1 мг.

Опыты по термокаталитическому разложению пиролитической смолы выполнялись аналогичным образом. При этом использовались два метода: первый обеспечивал преимущественно двухфазный контакт смолы и катализатора, второй – трехфазный контакт смола–катализатор–воздух. В первом случае в лабораторную емкость, содержащую пиролизную смолу, насыпался каталитический материал в виде порошка в массовом соотношении смола/катализатор равном 2.

При использовании второго метода смола заливалась в лабораторную емкость, в которую затем погружался пропитанный смолой пористый инертный материал (газосиликат в виде диска диаметром 35 мм и толщиной 3 мм). При этом верхняя грань диска оставалась непропитанной. В случае гомогенного процесса лабораторная емкость с пропитанным смолой газосиликатным диском помещалась в печь и выдерживалась при заданной постоянной температуре, после чего производилось взвешивание. В условиях каталитического процесса исследуемый каталитический материал насыпался на поверхность газосиликатного диска. При этом данный материал вначале напрямую не касался смолы. Однако при нагревании смола пропитала пористую инертную подкладку, разлагалась и таким образом контактировала и с каталитическим материалом, и с воздухом, что затруднено в опытах, проводимых по первому методу. Исходя из этого можно предположить, что проводимые по второму методу опыты более адекватны условиям, которые могут быть реализованы в пиролизном аппарате.

Исследования выполнялись при температурах 300, 350 и 400 °С. При более высоких температурах эксперименты не проводились, так как смола начинала гореть, что усложняло проведение замеров.

**Результаты исследования и их обсуждение.** Значения степеней разложения смолы, установленные в опытах, которые проводились при различных температурах и условиях, были рассчитаны по формуле

$$\alpha_t = \frac{m_0 - m_t}{m_0}, \quad (1)$$

где  $\alpha_t$  – степень разложения смолы в момент времени  $t$ ;  $m_0$  – исходная масса смолы, г;  $m_t$  – масса смолы в момент времени  $t$ , г.

В табл. 2–5 приведены экспериментальные значения степени термического разложения пиролитической смолы, установленные в выполненных исследованиях.

Значения степеней разложения пиролитической смолы в различные моменты времени, полученные при использовании второго метода исследования, представлены также на рис. 1–3.

Как следует из рассмотрения данных, приведенных в табл. 2–5 и на рис. 1–3, присутствие МОКС,  $MgSO_4$  и  $K_2SO_4$  в реакционной зоне приводит к существенному повышению степени разложения пиролитической смолы по сравнению с чисто гомогенным процессом. При этом влияние указанных веществ на кинетику термического разложения пиролитической смолы оказывается зависящим от температуры. Так, по данным, представленным на рис. 1, самое высокое значение степени разложения пиролитической смолы при температуре 300 °С было достигнуто в присутствии МОКС. Присутствие в реакционной зоне  $K_2SO_4$  также привело к росту степени разложения пиролитической смолы, хотя и в не такой степени, как присутствие МОКС.

Практически никакого влияния на кинетику термического разложения пиролитической смолы при температуре 300 °С не оказал сульфат магния. Однако при температуре 350 °С, как это видно из рис. 2, это соединение продемонстрировало активность, практически не отличимую от активности, МОКС и сульфата калия.

Т а б л и ц а 2. Степени гомогенного разложения пиролизической смолы  $\alpha_t$

T a b l e 2. Homogeneous decomposition degrees of pyrolysis tar,  $\alpha_t$

$t$ , мин	Первый метод			Второй метод		
	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$
1	0,0112	0,0072	0,0073	0,0099	0,0058	0,0061
3	0,0729	0,0509	0,3471	0,0712	0,0478	0,3095
5	0,2311	0,4599	0,8266	0,1514	0,2995	0,786
10	0,4630	0,7648	0,9083	0,3982	0,7957	0,9159
15	0,6143	–	0,9376	0,5807	0,8918	0,9581

Т а б л и ц а 3. Степени разложения пиролизической смолы  $\alpha_t$  в присутствии сульфата калия  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (33 %)

T a b l e 3. Degrees of decomposition of pyrolysis,  $\alpha_t$ , tar in the presence of potassium sulfate  $\text{K}_2\text{SO}_4$  (33 %)

$t$ , мин	Первый метод			Второй метод		
	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$
1	0,0098	0,0372	0,2886	0,0074	0,0198	0,1958
3	0,1168	0,6392	0,8599	0,1035	0,5192	0,8079
5	0,3324	0,7558	0,9133	0,5004	0,8916	0,9816
10	0,5334	–	0,9750	0,6915	0,9158	0,99
15	0,5883	–	–	0,7871	–	–
20	0,5902	–	–	0,89	–	–

Т а б л и ц а 4. Степени разложения пиролизической смолы  $\alpha_t$  в присутствии сульфата магния  $\text{MgSO}_4$  (33 %)

T a b l e 4. Degrees of decomposition of pyrolysis tar,  $\alpha_t$ , in the presence of magnesium sulfate  $\text{MgSO}_4$  (33 %)

$t$ , мин	Первый метод			Второй метод		
	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$
1	0,0128	0,0379	0,1510	0,0119	0,04014	0,0994
3	0,0814	0,6366	0,7846	0,0792	0,6032	0,7053
5	0,2641	0,8513	0,9274	0,142	0,8916	0,9866
10	0,4859	0,8565	0,9844	0,4693	0,9019	0,9901
15	0,5875	–	0,9908	0,591	0,9712	0,9908
20	0,6661	–	–	0,7013	–	–

Т а б л и ц а 5. Степени разложения пиролизической смолы  $\alpha_t$  в присутствии МОКС (33 %)

T a b l e 5. Degrees of decomposition of the pyrolysis tar,  $\alpha_t$ , in the presence of tailings of the production of potash fertilizers (33 %)

$t$ , мин	Первый метод			Второй метод		
	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 300\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 350\text{ }^\circ\text{C}$	$T = 400\text{ }^\circ\text{C}$
1	0,0257	0,0274	0,0343	0,0272	0,0256	0,1664
3	0,1258	0,4836	0,8076	0,16052	0,5076	0,5165
5	0,4353	0,9163	0,9122	0,4931	0,9278	0,8568
10	0,7873	0,9405	0,9742	0,8522	0,9350	0,9931
15	0,9969	0,9476	0,9985	0,9839	0,9406	–

При температуре  $400\text{ }^\circ\text{C}$  активность  $\text{MgSO}_4$ , как это следует из рис. 3, оказалась практически равной активности  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Эти соединения, как можно видеть, оказались более активными в отношении термического разложения пиролизической смолы, нежели МОКС.

Не было обнаружено влияния монокалийфосфата на кинетику разложения пиролизической смолы. Это вещество спекается при температуре порядка  $300\text{ }^\circ\text{C}$ , образуя стекловидную массу, которая не проявляет ни положительного, ни отрицательного воздействия на скорость разложения пиролизической смолы в условиях выполненных опытов.

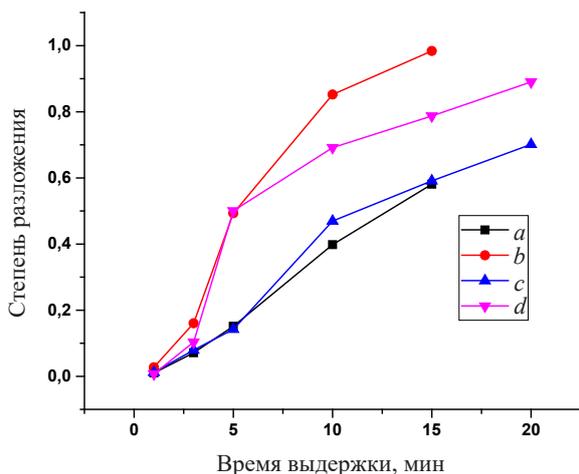


Рис. 1. Термическое разложение пиролизической смолы при температуре 300 °С: *a* – гомогенный процесс, *b* – в присутствии МОКС, *c* – в присутствии MgSO<sub>4</sub>, *d* – в присутствии K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Fig. 1. Thermal decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 300 °C: *a* – homogeneous process, *b* – in the presence of tailings of potassium salts production, *c* – in the presence of MgSO<sub>4</sub>, *d* – in the presence of K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

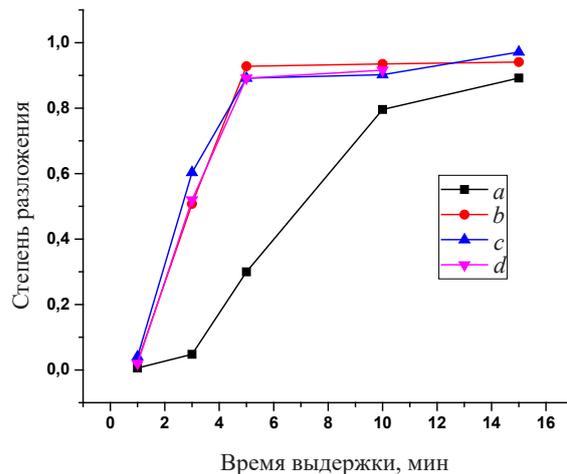


Рис. 2. Термическое разложение пиролизической смолы при температуре 350 °С: *a* – гомогенный процесс, *b* – в присутствии МОКС, *c* – в присутствии MgSO<sub>4</sub>, *d* – в присутствии K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Fig. 2. Thermal decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 350 °C: *a* – homogeneous process, *b* – in the presence of tailings of potassium salts production, *c* – in the presence of MgSO<sub>4</sub>, *d* – in the presence of K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

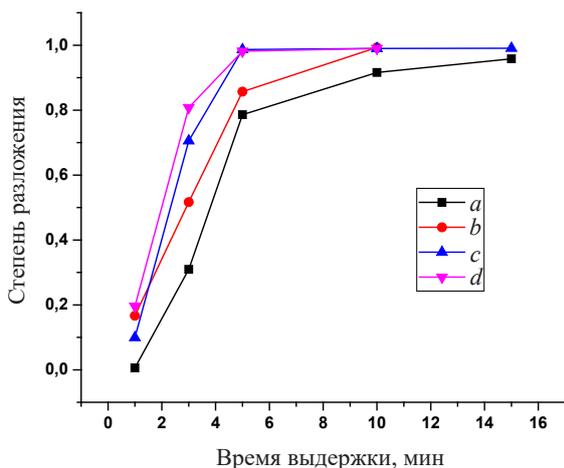


Рис. 3. Термическое разложение пиролизической смолы при температуре 400 °С: *a* – гомогенный процесс, *b* – в присутствии МОКС, *c* – в присутствии MgSO<sub>4</sub>, *d* – в присутствии K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Fig. 3. Thermal decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 400 °C: *a* – homogeneous process, *b* – in the presence of tailings of potassium salts production, *c* – in the presence of MgSO<sub>4</sub>, *d* – in the presence of K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>

Показатель *n* позволяет получить набор значений констант скорости разложения пиролизической смолы. Этот набор констант скорости необходимо аппроксимировать линейным уравнением

$$Y = A + Bx. \quad (4)$$

В случае ошибочного значения заданного показателя *n* линейная аппроксимация приводит к расчетным значениям констант скорости, которые изменяются с течением времени. Данное обстоятельство указывает на то, что заданное значение показателя *n* не соответствует кинетике

**Кинетика разложения смолы.** Анализ данных показал, что кинетика термического разложения пиролизической смолы в условиях выполненных исследований определяется уравнением Авраами–Ерофеева

$$[-\ln(1 - \alpha_t)]^n = kt, \quad (2)$$

где *n* – некоторый показатель, *k* – константа скорости формальной реакции разложения вещества, *t* – время выдержки образца при температуре разложения.

В табл. 6 представлены значения показателя *n*, определенные для всех изученных вариантов экспериментального исследования.

Данные значения показателя *n* были определены с помощью итеративной методики. Ее суть состоит в следующем.

Уравнение (2) можно разрешить относительно константы скорости реакции

$$k = \frac{1}{t} [-\ln(1 - \alpha_t)]^n. \quad (3)$$

Подстановка значений степени разложения  $\alpha_t$ , соответствующих времени выдержки *t*, в выражение (3) и некоторых начальных значений показателя *n*

Т а б л и ц а 6. Значения показателя  $n$  уравнения Авраами–Ерофеева для процесса термического разложения пиролизической смолы

T a b l e 6. Values of the exponent  $n$  of the Avrami–Erofeev equation for the process of thermal decomposition of pyrolysis tar

Показатель	Первый метод			Второй метод		
Гомогенный процесс						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$n$	0,621	0,415	0,610	0,616	0,440	0,542
Разложение в присутствии $\text{K}_2\text{SO}_4$						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$n$	0,667	0,445	1,110	0,553	1,238	0,553
Разложение в присутствии $\text{MgSO}_4$						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$n$	0,656	0,739	0,996	0,622	0,852	0,922
Разложение в присутствии МОКС						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$n$	0,495	0,775	0,746	0,539	0,830	0,681

процесса. Следовательно, требуется другое значение этого показателя. Такие расчеты повторяются до тех пор, пока не будет подобран такой показатель  $n$ , при котором линейная аппроксимация графика констант скорости позволит получить выражение, не зависящее от времени протекания реакции.

Пример корректного выбора показателя  $n$  на основе описанной итеративной процедуры представлен на рис. 4.

Точки на рис. 4 показывают экспериментальные значения константы скорости разложения пиролизической смолы, рассчитанные по выражению (3) с использованием показателя  $n$ , равного 0,621, а прямая линия, параллельная оси абсцисс, дает усредненное значение константы скорости, определяемое линейной аппроксимацией этих экспериментальных величин:

$$Y = 0,07118 - 1,35228 \cdot 10^{-5}X, r = -0,00749, p = 0,99046. \tag{5}$$

Здесь  $r$  – коэффициент корреляции, а  $p$  – статистический параметр, определяющий близость к нулю коэффициента корреляции.

Как следует из результатов линейной аппроксимации, использование показателя  $n$ , равного 0,621, привело к значению коэффициента корреляции, близкому к нулю. Такой же результат установлен для коэффициента  $B$  линейного уравнения (4). Значение статистического параметра  $p$ , определяющего отличие этого коэффициента от нуля, составило примерно 0,99. Это означает, что с вероятностью, равной 99 %, значение коэффициента  $B$  можно принять равным нулю.

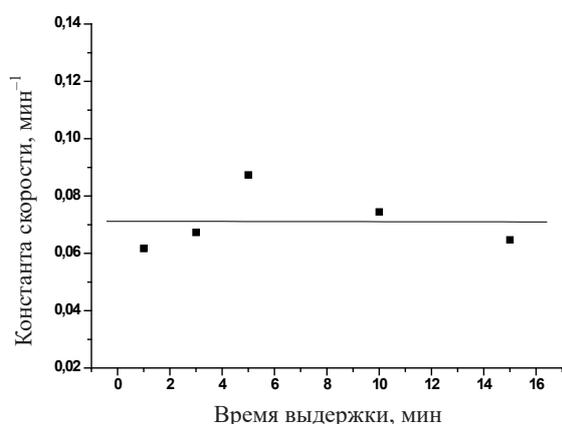


Рис. 4. Зависимость константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы при температуре 300 °С (первый метод исследования)

Fig. 4. Dependence of the rate constant of homogeneous decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 300 °C (the first method of research)

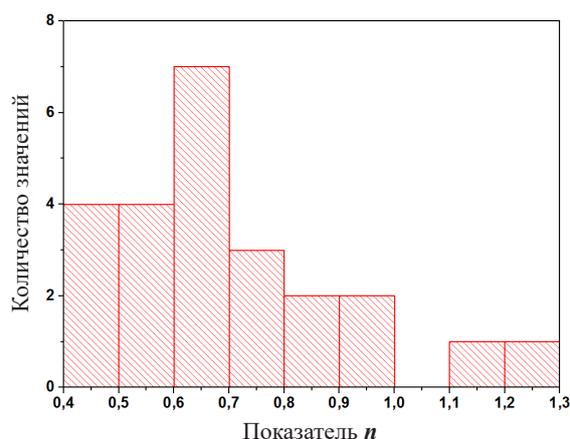


Рис. 5. Частотные характеристики показателя  $n$  уравнения Авраами–Ерофеева

Fig. 5. Frequency characteristics of the exponent  $n$  of the Avrami–Erofeev equation

Анализ табл. 6 показал, что все изученные варианты экспериментальных данных характеризуются своим индивидуальным значением показателя  $n$ . Частотное распределение этого параметра представлено на рис. 5.

Видно, что наиболее часто встречающееся значение показателя  $n$  заключено в пределах от 0,6 до 0,7. Среднее значение этого показателя, рассчитанное по данным табл. 6, составило 0,694 (95 % ДИ от 0,605 до 0,783), а медианное значение – 0,639.

Данные табл. 6 и представленные на рис. 5 показывают, что в случае термического разложения пиролитической смолы каждый исследованный образец имеет свой индивидуальный показатель  $n$ . Это означает, что в случае разложения пиролитической смолы не существует такого универсального показателя  $n$ , который позволил бы получить корректные значения константы скорости данного процесса для других образцов и других температур.

Описанная процедура расчета показателя  $n$  позволяет также определить усредненное по всем экспериментальным точкам значение константы скорости ( $\bar{k}$ ). Оно дается первым членом в правой части линейной аппроксимации. Например, в случае гомогенного разложения пиролитической смолы при температуре 300 °С (первый метод исследования) усредненное значение константы скорости, как следует из результатов линейной аппроксимации, составило 0,07118 мин<sup>-1</sup>.

Эту величину можно также рассчитать по формуле

$$\bar{k} = \frac{\sum_{i=1}^m k_i}{m}, \quad (6)$$

где  $k_i$  – значение константы скорости в момент времени  $t_i$ , вычисленное по выражению (3), а  $m$  – количество экспериментальных точек.

В табл. 7 приведены усредненные значения константы скорости термического разложения пиролитической смолы, рассчитанные с использованием формулы (6) и данных табл. 2–6.

Т а б л и ц а 7. Усредненные значения константы скорости термического разложения смолы

Table 7. Average tar thermal decomposition rate constants

Параметр	Первый метод			Второй метод		
Гомогенный процесс						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$k, \text{мин}^{-1}$	0,071	0,127	0,165	0,063	0,107	0,160
Разложение в присутствии $\text{K}_2\text{SO}_4$						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$k, \text{мин}^{-1}$	0,072	0,267	0,493	0,100	0,357	0,434
Разложение в присутствии $\text{MgSO}_4$						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$k, \text{мин}^{-1}$	0,068	0,228	0,385	0,065	0,235	0,396
Разложение в присутствии МОКС						
$t, ^\circ\text{C}$	300	350	400	300	350	400
$k, \text{мин}^{-1}$	0,145	0,217	0,297	0,144	0,227	0,299

На рис. 6. для сравнения представлены экспериментальные (второй метод исследования) и расчетные значения степени гомогенного разложения пиролитической смолы при температуре 350 °С.

Расчетные значения степени разложения пиролитической смолы, показанные на этом рисунке, были вычислены по выражению

$$\alpha_t = 1 - \exp\left(-(k \cdot t)^{1/n}\right), \quad (7)$$

полученному путем преобразования уравнения (2). При вычислении степени разложения были использованы показатель  $n$ , равный 0,440 (см. табл. 6), и усредненное значение константы скорости, равное 0,107 мин<sup>-1</sup> (см. табл. 7).

Как можно видеть из данных, приведенных на рис. 6, методы определения показателя  $n$  и расчета значения константы скорости, описанные выше, позволяют получить хорошее согласие между расчетными и экспериментальными значениями степени разложения пиролизической смолы. Аналогичное согласие в расчетных и экспериментальных значениях степени разложения пиролизической смолы было установлено и для других вариантов экспериментальных данных, установленных в настоящей работе. Это позволяет сделать вывод о том, что уравнение Аврамы–Ерофеева корректно описывает кинетику термического разложения древесной пиролизической смолы. Полученный результат говорит о том, что, выбрав соответствующим образом параметры уравнения Аврамы–Ерофеева, можно адекватно описать изменение степени конверсии от времени. Однако это соответствие получено на том же массиве данных, на котором определялись параметры уравнения. Иначе говоря, возможность достаточно точного предсказания значений этих констант отсутствует.

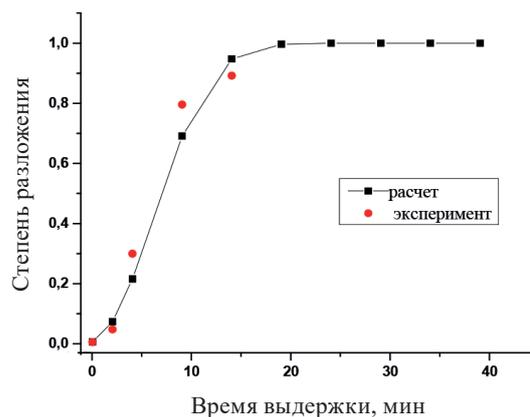


Рис. 6. Сравнение экспериментальных (второй метод исследования) и расчетных степеней гомогенного разложения пиролизической смолы при температуре 350 °С

Fig. 6. Comparison of experimental (second research method) and calculated degrees of homogeneous decomposition of pyrolysis tar at a temperature of 350 °C

Как известно [15, 16], указанное уравнение описывает кинетику термического разложения вещества, лимитирующей стадией которого является зародышеобразование. И это позволяет сделать вывод, что лимитирующей стадией разложения древесной пиролизической смолы в условиях, изученных в настоящей работе, является зародышеобразование.

На рис. 7, а представлена Аррениусовская зависимость константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы, определенная на основании данных, установленных при использовании первого метода исследования.

Аппроксимация данных, представленных на рис. 7, b, приводит к следующим результатам:

$$Y = -\frac{3,26913}{T} + 3,09821, \quad R_{adj}^2 = 0,944, \quad p = 0,10703. \quad (8)$$

Здесь  $R_{adj}^2$  – скорректированный коэффициент детерминации Пирсона;  $p$  – статистический параметр, определяющий вероятность того, что угол наклона получен случайно и, следовательно, не определяет реальную зависимость константы скорости.

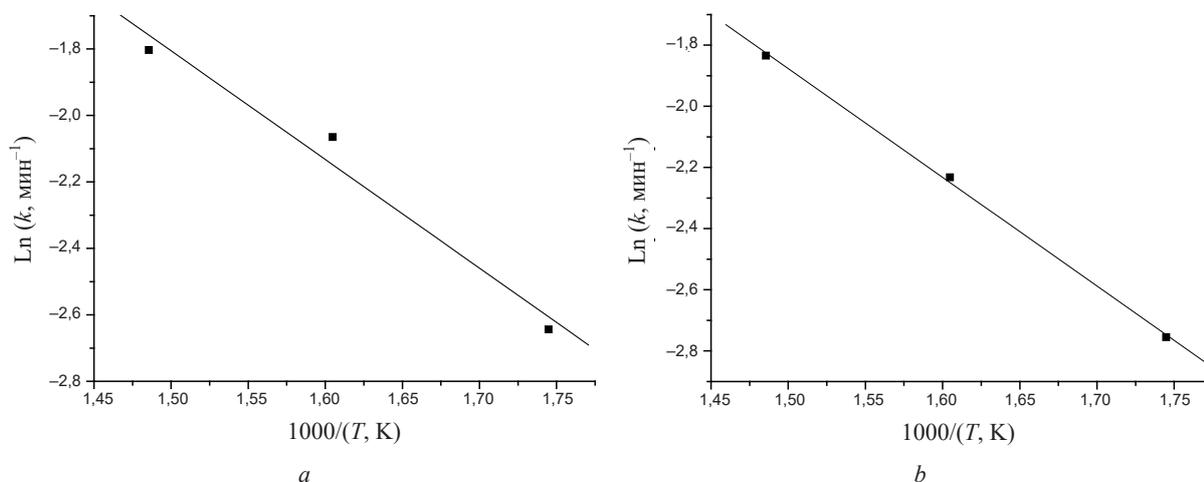


Рис. 7. Аррениусовская зависимость реакции гомогенного разложения пиролизической смолы: а – первый метод исследования, б – второй метод исследования

Fig. 7. Arrhenius dependence of the reaction of homogeneous decomposition of pyrolysis tar: а – the first method of investigation, б – the second method of investigation

Умножение статистического параметра  $p$  на 100 % позволяет определить вероятность случайного значения угла наклона Аррениусовской зависимости. В обсуждаемом случае эта вероятность составляет 10,7 %, что говорит о недостаточной точности полученных экспериментальных данных константы скорости.

Использование коэффициентов аппроксимации (8) дает значение энергии активации  $E$ , которое составляет 27,2 кДж/моль, и значение предэкспоненциального фактора  $A$ , равное  $2,22 \cdot 10^1 \text{ мин}^{-1}$ .

В соответствии с этими величинами Аррениусовское выражение для константы скорости гомогенного разложения пиролитической смолы (первый метод исследования) запишется в виде

$$k = 2,22 \cdot 10^1 \cdot \exp\left(-\frac{27200}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (9)$$

Аррениусовская зависимость константы скорости гомогенного разложения пиролитической смолы, определенная на основании экспериментальных результатов, установленных при использовании второго метода исследований, приведена на рис. 7, *b*.

Аппроксимация данных, представленных на рис. 7, *b*, приводит к следующим результатам:

$$Y = -\frac{3,55679}{T} + 3,45876, \quad R_{adj}^2 = 0,99797, \quad p = 0,0203. \quad (10)$$

Использование коэффициентов аппроксимации (10) дает значения энергии активации  $E = 29,6$  кДж/моль и предэкспоненциального фактора  $A = 3,18 \cdot 10^1 \text{ мин}^{-1}$ .

Аррениусовское выражение для константы скорости гомогенного разложения пиролитической смолы (второй метод исследования) с учетом этих величин запишется в виде

$$k = 3,18 \cdot 10^1 \cdot \exp\left(-\frac{29600}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (11)$$

Выражение (11) дает более точные значения константы скорости гомогенного разложения пиролитической смолы, нежели выражение (9). На это указывает сравнение результатов аппроксимации значений константы скорости, установленных с помощью обоих методов исследований. Так, согласно выражению (10), значение скорректированного коэффициента детерминации в случае данных, установленных с использованием второго метода исследования, составило 0,99797, в то время как аналогичная величина в случае данных, полученных при помощи первого метода, составила только 0,944. В пользу вывода о том, что уравнение (11) дает более точные значения константы скорости, говорит сравнение значений статистического параметра  $p$ , а также данные, приведенные на рис. 7. Исходя из этого можно сделать вывод о том, что энергия активации гомогенного разложения пиролитической смолы составляет примерно 29,6 кДж/моль.

Ограниченное количество экспериментальных данных, установленных в опытах по исследованию кинетики разложения пиролитической смолы в присутствии  $K_2SO_4$ ,  $MgSO_4$  и МОКС, не позволяет корректно выделить вклад этих веществ в разложение пиролитической смолы. Данное ограничение стало причиной того, что в настоящей работе была выполнена только косвенная оценка влияния указанных соединений на скорость разложения пиролитической смолы. Эта оценка опиралась на рассмотрение некоторой фиктивной константы скорости, отражающей совместную убыль пиролитической смолы в гомогенном процессе и в процессе, обусловленном влиянием вещества, введенного в реакционную зону с целью исследования его каталитических свойств. Такой подход позволил определить лишь некоторую суммарную константу скорости.

На рис. 8, *a* представлена Аррениусовская зависимость такой константы скорости разложения пиролитической смолы в присутствии МОКС, установленная на основании определенных при использовании первого метода исследования данных.

Результаты аппроксимации данных, приведенных на рис. 8, *a*, следующие:

$$Y = -\frac{2,76499}{T} + 2,90001, \quad R_{adj}^2 = 0,99879, \quad p = 0,01563. \quad (12)$$

Использование коэффициентов аппроксимации (12) приводит к значениям энергии активации  $E = 23,0$  кДж/моль и предэкспоненциального фактора  $A = 1,82 \cdot 10^1 \text{ мин}^{-1}$ .

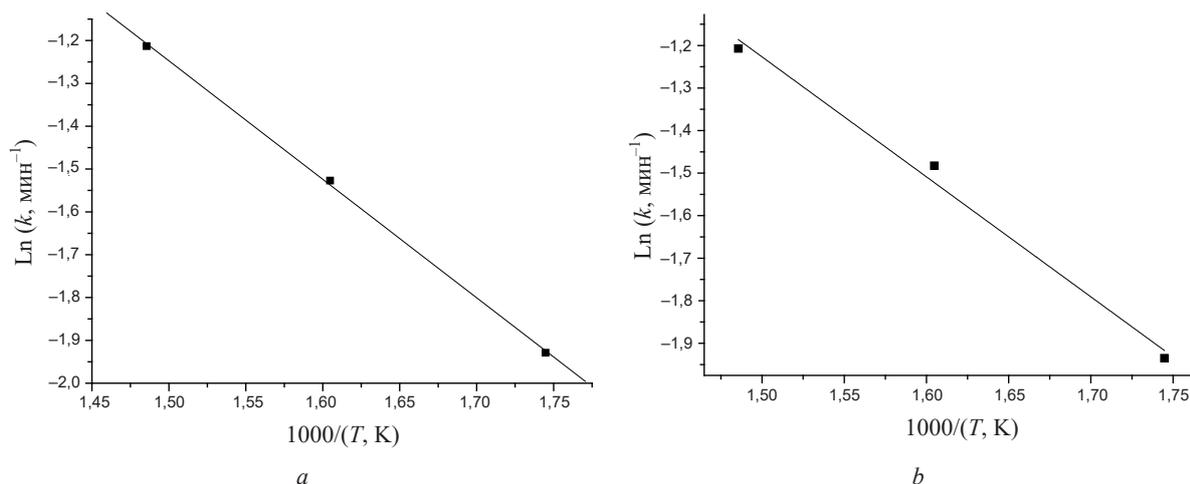


Рис. 8. Аррениусовская зависимость константы скорости разложения пиролизической смолы в присутствии МОКС: *a* – первый метод исследования, *b* – второй метод исследования

Fig. 8. Arrhenius dependence of the rate constant of decomposition of pyrolysis tar in the presence of tailings of potassium salts production: *a* – the first method of investigation, *b* – the second method of investigation

В соответствии с этими величинами Аррениусовское выражение для константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы (первый метод исследования) запишется в виде

$$k = 1,82 \cdot 10^1 \cdot \exp\left(-\frac{23000}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (13)$$

Аррениусовская зависимость формальной константы скорости разложения пиролизической смолы в присутствии МОКС, установленная на основании определенных при использовании второго метода исследования данных, представлена на рис. 8, *b*.

Результаты аппроксимации данных, приведенных на рис. 8, *b*, представим следующим образом:

$$Y = -\frac{2,82038}{T} + 3,0038, \quad R_{adj}^2 = 0,98272, \quad p = 0,05927. \quad (14)$$

Использование коэффициентов аппроксимации (14) дает значения энергии активации  $E = 23,4$  кДж/моль и предэкспоненциального фактора  $A = 2,02 \cdot 10^1$  мин<sup>-1</sup>.

Аррениусовское выражение для константы скорости гомогенного разложения пиролизической смолы (второй метод исследования) запишется при этом в виде

$$k = 2,02 \cdot 10^1 \cdot \exp\left(-\frac{23400}{RT}\right), \text{ мин}^{-1}. \quad (15)$$

Сравнение выражений (13) и (15) показывает, что первый и второй методы исследования в случае введения в реакционную зону частиц МОКС приводят практически к одинаковому значению энергии активации, равному примерно 23 кДж/Моль.

Аналогичный анализ был также выполнен на основании экспериментальных результатов, установленных в опытах в присутствии сульфата калия (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) и сульфата магния (MgSO<sub>4</sub>). Аррениусовские параметры термического разложения пиролизической смолы в присутствии указанных веществ приведены в табл. 8. Здесь же для сравнения приведены Аррениусовские параметры, установленные для гомогенного разложения пиролизической смолы и разложения в присутствии МОКС.

Анализ данных табл. 8 показывает, что наиболее точные результаты были установлены в ходе гомогенного процесса при использовании второго метода исследования, а также при изучении каталитических свойств частиц МОКС. Корректные данные для частиц были определены при использовании как первого, так и второго метода исследования. Точность данных, уста-

новленных в случае введения в реакционную зону  $\text{MgSO}_4$  и  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , существенно ниже, нежели в случае гомогенного разложения пиролитической смолы и разложения в присутствии частиц МОКС. На это указывает сравнение значений скорректированного коэффициента детерминации, а также значений статистического параметра  $p$ , приведенных в табл. 8.

Т а б л и ц а 8. Аррениусовские параметры разложения пиролитической смолы

T a b l e 8. Arrhenius decomposition parameters of pyrolysis tar

Тип исследования	Параметры			
	$E$ , кДж/моль	$A$ , мин <sup>-1</sup>	$R^2_{adj}$	$p$
Первый метод исследования				
Гомогенный процесс	27,2	$2,22 \cdot 10^1$	0,9440	0,10 703
В присутствии МОКС	23,0	$1,82 \cdot 10^1$	0,99 879	0,01 563
В присутствии $\text{K}_2\text{SO}_4$	62,4	$3,78 \cdot 10^4$	0,94 818	0,10 292
В присутствии $\text{MgSO}_4$	56,1	$9,57 \cdot 10^3$	0,93 645	0,11 409
Второй метод исследования				
Гомогенный процесс	29,6	$3,18 \cdot 10^1$	0,99 797	0,0203
В присутствии МОКС	23,4	$2,02 \cdot 10^1$	0,98 272	0,05 927
В присутствии $\text{K}_2\text{SO}_4$	47,9	$2,69 \cdot 10^3$	0,75 702	0,22 665
В присутствии $\text{MgSO}_4$	58,5	$1,53 \cdot 10^4$	0,92 756	0,1219

Данное обстоятельство не позволяет сделать обоснованный вывод относительно корректности определения Аррениусовских параметров разложения пиролитической смолы в присутствии  $\text{MgSO}_4$  и  $\text{K}_2\text{SO}_4$ . Как следует из табл. 8, энергия активации термического разложения пиролитической смолы в присутствии сульфатов магния и калия превышает примерно в 2 раза энергию активации чисто гомогенного процесса. При этом скорость разложения пиролитической смолы в присутствии этих веществ при температуре 350 °С и выше практически в 2 раза превышает скорость гомогенного процесса.

Как известно, возрастание скорости химического процесса при введении в реакционную зону какого-либо вещества и снижение энергии активации процесса свидетельствуют о каталитической активности такого вещества. Именно таким свойством обладает МОКС. Как видно из табл. 8, суммарная энергия активации разложения пиролитической смолы при введении в реакционную зону частиц МОКС снижается примерно на 6 кДж/моль по сравнению с гомогенным процессом. Исходя из этого можно заключить, что МОКС является катализатором термического разложения пиролитической смолы. Как было установлено в ходе эксперимента, введение  $\text{MgSO}_4$  или  $\text{K}_2\text{SO}_4$  в реакционную зону приводит к ускорению термического разложения пиролитической смолы, однако при этом происходит повышение энергии активации. Одним из возможных объяснений этого несоответствия, по-видимому, следует считать недостаточную точность экспериментальных результатов, установленных при изучении каталитических свойств сульфатов магния и калия, на что указывают высокие значения статистического параметра  $p$  для этих соединений. И это не позволяет в настоящее время сделать вывод относительно роли указанных веществ в процессе термического разложения пиролитической смолы. Однако можно предположить, что ускорение процесса разложения смолы в присутствии  $\text{MgSO}_4$  и  $\text{K}_2\text{SO}_4$ , как и в случае МОКС, обусловлено каталитическим воздействием.

**Заключение.** В ходе экспериментального исследования термического разложения пиролитической смолы, выполненного в изотермических условиях при температурах 300, 350 и 400 °С, установлено, что кинетику этого процесса можно описать с помощью уравнения Авраами–Ерофеева с переменным показателем  $n$ . Анализ полученных данных показал, что область изменения этого показателя включает величины от 0,415 до 1,238. Среднее значение показателя  $n$ , рассчитанное по всем вариантам исследования, составило 0,694 (95 % ДИ от 0,605 до 0,783), а медианное значение – 0,639. Как известно, уравнение Авраами–Ерофеева описывает кинетику термического разложения вещества в конденсируемом состоянии, определяемую процессом зародышеобразования. Это позволяет предположить, что в случае термического разложения пиролитической смолы в интервале температур 300–400 °С зародышеобразование является лимитирующей стадией суммарного процесса.

Обнаружено, что скорость разложения пиролизической смолы возрастает в случае внесения в реакционную зону частиц МОКС, сульфата калия и сульфата магния. В случае частиц МОКС можно с большой уверенностью утверждать, что это результат каталитического влияния МОКС. В случае сульфата калия и сульфата магния можно предполагать, что ускорение термического разложения пиролизической смолы в присутствии этих веществ также обусловлено каталитическим эффектом.

### Список использованных источников

1. Fortov, V. E. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia / V. E. Fortov, O. S. Popel' // *Therm. Eng.* – 2014. – Vol. 61, № 6. – P. 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>
2. Coal and Biomass Gasification: Recent Advances and Future Challenges / S. De [et al.]. – Springer Nature, 2018. – 521 p. <https://dx.doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>
3. Afanas'eva, O. V. Energy Efficiency of Small Coal-Fired Power Plants as a Criterion of Their Wide Applicability / O. V. Afanas'eva, G. R. Mingaleeva // *Solid Fuel Chem.* – 2009. – Vol. 43, № 1. – P. 55–59. <http://dx.doi.org/10.3103/S0361521909010121>
4. Доброго, К. В. Макрокинетические модели термического разложения доломита для расчета сорбционных систем газогенераторов / К. В. Доброго // *Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ.* – 2015. – № 5. – С. 51–59.
5. Guoging Guan. Heterogeneous Catalysts from Natural Sources for Tar Removal: A Mini Review / Guoging Guan, Xiaogang Hao, Abuliti Abudula // *J. Adv. Catal. Sci. Techn.* – 2014. – Vol. 1, № 1. – P. 20–28. <http://dx.doi.org/10.15379/2408-9834.2014.01.01.4>
6. Sutton, D. Review of literature on catalysts for biomass gasification / D. Sutton, B. Kelleher, J. R. H. Ross // *Fuel Process. Technol.* – 2001. – Vol. 73, № 3. – P. 155–173. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00208-9)
7. Characterization and treatment of tars and biomass gasifiers / E. G. Baker [et al.] // *AICHE 1988: Summer National Meeting, Denver, Colorado. August 21–24, 1988.* – Denver, 1988. – P. 1–11.
8. Dayton, D. A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report [Electronic resource] / D. Dayton // *NREL/TP-510-32815.* – 2002. – 27 p. – Mode of access: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32815.pdf> – Date of access: 10.11.2020
9. El-Rub, Z. A. Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification / Z. A. El-Rub, E. A. Bramer, G. Brem // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 2004. – Vol. 43, № 22. – P. 6911–6919. <https://doi.org/10.1021/ie0498403>
10. Катализ и энергетика. Опыт Института катализа им. Г. К. Борескова СО РАН / В. Н. Пармон // *Энергет. вестн.* – 2017. – № 22. – С. 56–73.
11. Commercial Steam Reforming Catalysts To Improve Biomass Gasification with Steam–Oxygen Mixtures. 2. Catalytic Tar Removal / M. P. Azner [et al.] // *Ind. Eng. Chem. Res.* – 1998. – Vol. 37, № 7. – P. 2668–2680. <https://doi.org/10.1021/ie9706727>
12. Milne, T. A. Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation and Conversion [Electronic resource] / T. A. Milne, N. Abatzoglou, R. J. Evans. – NREL Technical Report (NREL/TP-570-25357), November 1998. – Mode of access: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25357.pdf> – Date of access: 10.11.2020.
13. Catalytic Cracking of Tars Derived from Rice Hull Gasification over Goethite and Palygorskite / Haibo Liu [et al.] // *Appl. Clay Sci.* – 2012. – Vol. 70. – P. 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.006>
14. Исследование кинетики термического разложения пиролизной смолы / М. В. Малько [и др.] // *Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук.* – 2016. – № 4. – С. 84–90.
15. Vyazovkin, S. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data / S. Vyazovkin, C. A. Wight // *Thermochim. Acta.* – 1999. – Vol. 340–341. – P. 53–68. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00253-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00253-1)
16. Yunging. Han. Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics: Thesis and Dissertation – Mechanical Engineering [Electronic resource]. – Lexington, Kentucky, 2014. – Mode of access: [https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&content=me\\_etds](https://uknowledge.uky.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1036&content=me_etds) – Date of access: 15.05.2019.

### References

1. Fortov V. E., Popel' O. S. The current status of the development of renewable energy sources worldwide and in Russia. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 6, pp. 389–398. <https://doi.org/10.1134/S0040601514060020>
2. De S., Agarwal A. K., Moholkar V. S., Bhaskar T. *Coal and Biomass Gasification. Recent Advances and Future Challenges.* Springer Nature Publ., 2018. 521 p. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-7335-9>
3. Afanas'eva O. V., Mingaleeva G. R. Energy Efficiency of Small Coal-Fired Power Plants as a Criterion of Their Wide Applicability. *Solid Fuel Chemistry*, 2009, vol. 43, no. 1, pp. 55–59. <http://doi.org/10.3103/S0361521909010121>
4. Dobrego K. V. Dolomite thermal-decomposition macrokinetic models for evaluation of the gasgenerators sorbent systems. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2015, no. 5, pp. 51–59 (in Russian).

5. Guoging Guan, Xiaogang Hao, Abuliti Abudula. Heterogeneous Catalysts from Natural Sources for Tar Removal: A Mini Review. *Journal of Advanced Catalysis Science and Technology*, 2014, vol. 1, no. 1, pp. 20–28. <http://doi.org/10.15379/2408-9834.2014.01.01.4>
6. Sutton D., Kelleher B., Ross J. R. H. Review of literature on catalysts for biomass gasification. *Fuel Processing Technology*, 2001, vol. 73, no. 3, pp. 155–173. [https://doi.org/10.1016/S0378-3820\(01\)00208-9](https://doi.org/10.1016/S0378-3820(01)00208-9)
7. Baker E. G., Brown M. D., Elliott D. C., Mudge L. K. Characterization and Treatment of Tars from Biomass Gasifiers. *AIChE 1988: Summer National Meeting, Denver, Colorado. August 21–24, 1988*. Denver, 1988, pp. 1–11.
8. Dayton D. *A Review of the Literature on Catalytic Biomass Tar Destruction. Milestone Completion Report. NREL/TP-510-32815*. National Renewable Energy Laboratory, 2002. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/32815.pdf> (accessed 10 November 2020).
9. El-Rub Z. A., Bramer E. A., Brem G. Review of Catalysts for Tar Elimination in Biomass Gasification. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2004, vol. 43, no. 22, pp. 6911–6919. <https://doi.org/10.1021/ie0498403>
10. Parmon V. N. Catalysis and energy. Experience of the Boreskov Institute of Catalysis SB RAS. *Energeticheskii vestnik = Energy Bulletin*, 2017, no. 22, pp. 56–73 (in Russian).
11. Azner, M. P., Caballero M. F., Gil J., Martin J. A. Commercial Steam Reforming Catalysts To Improve Biomass Gasification with Steam–Oxygen Mixtures. 2. Catalytic Tar Removal. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1998, vol. 37, no. 7, pp. 2668–2680. <https://doi.org/10.1021/ie9706727>
12. Milne T. A., Abatzoglou N., Evans R. J. *Biomass Gasifier “Tars”: Their Nature, Formation and Conversion*. NREL Technical Report (NREL/TP-570-25357), November 1998. Available at: <https://www.nrel.gov/docs/fy99osti/25357.pdf> (accessed 10 November 2020).
13. Haibo Liu, Tianhu Chen, Donguin Change, Chen Dong, He Hongping, Frost R. Catalytic Cracking of Tars Derived from Rice Hull Gasification over Goethite and Palygorskite. *Applied Clay Science*, 2012, vol. 70, pp. 51–57. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2012.09.006>
14. Mal’ko M. V., Asadchii A. N., Vasilevich S. V., Degterov D. V. Investigation of the kinetics of thermal decomposition of pyrolysis resin *Vestsi Natsyyanal’nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2016, no. 4, pp. 84–90 (in Russian).
15. Vyazovkin S., Wight C. A. Model-free and model-fitting approaches to kinetic analysis of isothermal and nonisothermal data. *Thermochimica Acta*, 1999, vol. 340–341, pp. 53–68. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(99\)00253-1](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(99)00253-1)
16. Han Y. *Theoretical Study of Thermal Analysis Kinetics: Thesis and Dissertation – Mechanical Engineering*. Lexington, Kentucky, 2014. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/232563059.pdf> (accessed 15 May 2019).

### Информация об авторах

*Малько Михаил Владимирович* – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [mikhailvm@bas-net.by](mailto:mikhailvm@bas-net.by)

*Добрего Кирилл Викторович* – доктор физико-математических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Республика Беларусь). <https://orcid.org/0000-0002-1754-8262>. E-mail: [kirilldobrego@gmail.com](mailto:kirilldobrego@gmail.com)

*Василевич Сергей Владимирович* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией, Белорусская государственная академия авиации (ул. Уборевича, 77, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [svasilevich@yandex.ru](mailto:svasilevich@yandex.ru)

*Дегтеров Дмитрий Валентинович* – старший научный сотрудник, Институт энергетики Национальной академии наук Беларуси (ул. Академическая, 15, корп. 2, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: [ddegterov@mail.ru](mailto:ddegterov@mail.ru)

### Information about the authors

*Mikhail V. Malko* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [mikhailvm@bas-net.by](mailto:mikhailvm@bas-net.by)

*Kirill V. Dobrego* – Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). <https://orcid.org/0000-0002-1754-8262>. E-mail: [kirilldobrego@gmail.com](mailto:kirilldobrego@gmail.com)

*Siarhei V. Vasilevich* – Ph. D. (Engineering), Head of the Laboratory, Belarusian State Aviation Academy (77, Ubo-revich Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [svasilevich@yandex.ru](mailto:svasilevich@yandex.ru)

*Dmitry V. Degterov* – Senior Researcher, Institute of Power Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus (15, building 2, Academicheskaya Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: [ddegterov@mail.ru](mailto:ddegterov@mail.ru)

**А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков**

*Витебский государственный технологический университет, Витебск, Республика Беларусь*

## **МЕТОДЫ РАСЧЕТА КИНЕТИКИ СУШКИ НАТУРАЛЬНОЙ КОЖИ**

**Аннотация.** Изложен способ расчета кинетики сушки, основанный на уравнении кинетики А. В. Лыкова и кривых скорости сушки для процесса сушки натуральной кожи. Рассмотрены методы аппроксимации кривых скорости для определения времени сушки. Дано уравнение для расчета длительности сушки натуральной кожи при переменном коэффициенте сушки. В результате обработки опытных данных по сушке натуральных кож определены уравнения по вычислению плотностей потоков тепла, интенсивности испарения влаги и температуры материала в периоде падающей скорости сушки. С использованием аппроксимации кривых скорости сушки натуральных кож найдены уравнения для расчета времени сушки по методам А. В. Лыкова, В. В. Красникова, Н. С. Михеевой. Представлена зависимость относительной скорости сушки от безразмерного влагосодержания. Приведены расчеты удельных расходов теплоты на нагрев влажного материала и на испарение из него влаги. На основе уравнения кинетики сушки и уравнения для плотности потока тепла получена формула для определения среднеинтегральной температуры в периоде падающей скорости сушки. Проведены проверка достоверности опытных уравнений и сравнение расчетных значений времени сушки и температуры материала с экспериментом. Предложенные приближенные методы расчета кривой скорости сушки кожи позволяют оценить характер протекания процесса сушки конкретного материала по отдельным зонам второго периода и при изменении режима сушки. Они также дают возможность определить важнейшие параметры кинетики сушки и сократить число экспериментов.

**Ключевые слова:** влагосодержание, коэффициент сушки, время сушки, температура мокрого термометра, скорость сушки

**Для цитирования:** Ольшанский, А. И. Методы расчета кинетики сушки натуральной кожи / А. И. Ольшанский, А. А. Котов, С. М. Кузьменков // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 393–401. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-393-401>

**Anatolii I. Ol'shanskii, Alexej A. Kotow, Sergey M. Kuzmenkov**

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

## **METHODS OF CALCULATING THE KINETICS OF DRYING OF NATURAL LEATHER**

**Abstract.** A method for calculating drying kinetics based on A. V. Lyikov's kinetics equation and drying rate curves for the drying process of natural leather is presented. Methods of approximating velocity curves to determine the drying time are considered. An equation for calculating the drying time of natural leather with a variable drying factor is presented. Based on the processing of experimental data on drying of natural leathers, equations for calculating heat flux densities, intensity of moisture evaporation and material temperature in the period of falling drying rate are presented. Based on the approximation of drying speed curves for natural leathers, the equations for calculating the drying time by the methods of A. V. Lyikov, V. V. Krasnikov, and N. S. Mikheeva are considered. The dependence of the relative drying rate on the dimensionless moisture content is presented. The reliability of the experimental equations was checked and the calculated values of the drying time and material temperature were compared with the experiment. The proposed approximate methods of calculating the skin drying speed curve make it possible to evaluate the nature of the drying process of a particular material by individual zones of the second period and when changing the drying mode. They also make possible determination of the most important parameters of drying kinetics and reduction of the number of experiments.

**Keywords:** moisture content, drying coefficient, drying time, the temperature of the wet thermometer, drying speed

**For citation:** Ol'shanskii A. I., Kotow A. A., Kuzmenkov S. M. Methods of calculating the kinetics of drying of natural leather. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 393–401 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-393-401>

**Введение.** Сушка натуральных кож – не только теплофизический, но и важный технологический процесс, при котором этот материал приобретает необходимые качества промышленной кожи [1–3].

Натуральные кожи являются термочувствительными материалами, поэтому процессы сушки кожи проводятся при определенных условиях: при мягком температурном режиме воздуха  $t_c = 30 \div 60$  °С, высоком влагосодержании среды  $\varphi = 30 \div 80$  % и скорости воздушного потока  $v = 0,5 \div 1,5$  м/с. Основным препятствием для быстрой интенсивной сушки считается значительная усадка, приводящая к короблению материала [1–5].

Под кинетикой сушки понимают изменение среднего по объему материала влагосодержания  $\bar{u}(\tau)$  и средней температуры  $\bar{t}(\bar{u})$  с течением времени  $\tau$ . Закономерности кинетики процесса сушки дают возможность рассчитать количество испаренной влаги, расход теплоты на сушку и описать действительный процесс массотеплообмена при взаимодействии поверхности влажного тела с окружающей средой. Кинетика сушки позволяет исследовать основные закономерности сушки и дать для инженерных расчетов приближенные уравнения для определения длительности сушки  $\tau$  и температуры материала  $\bar{t}$ .

Основной задачей исследования кинетики сушки является определение длительности процесса и температуры материала, поскольку эти параметры обуславливают качество подвергающегося сушке материала и размеры сушильной камеры. Аналитический путь решения этой задачи чрезвычайно сложен и не всегда возможен. В силу этих трудностей необходимо прибегать к экспериментальным исследованиям с целью разработки приближенных зависимостей для расчета основных параметров кинетики сушки с минимальным числом постоянных, определяемых опытным путем [1–6].

*Цель настоящего исследования* – на основе обработки опытных данных по сушке натуральной кожи и уравнения кинетики сушки А. В. Лыкова получить экспериментальные уравнения для расчета основных параметров кинетики сушки натуральной кожи.

**Уравнения кинетики сушки.** Чтобы установить основные кинетические зависимости для расчета процесса сушки натуральной кожи, воспользуемся при обработке опытных данных уравнением кинетики сушки А. В. Лыкова и действительными кривыми скорости сушки кожи, полученными графическим дифференцированием кривых сушки [1, 6–9].

Основное уравнение кинетики сушки запишем в виде [1]

$$\frac{q_{II}}{q_I} = N^* (1 + Rb). \quad (1)$$

Здесь  $q_I$  – плотность потока теплоты в периоде постоянной скорости сушки (первый период,  $q_I = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N$ , где  $r$  – теплота парообразования,  $\rho$  – плотность,  $R_V = V/F$  – отношение объема тела к поверхности,  $N$  – скорость сушки в первом периоде);  $q_{II}$  – плотность потока тепла в периоде падающей скорости (второй период);  $N^*$  – относительная скорость сушки;  $Rb$  – число Ребиндера, устанавливающее связь между теплообменом и влагообменом.

В процессе сушки тонких тел, таких как кожа, при мягких режимах сушки расход теплоты на нагревание влажного тела значительно меньше расхода тепла на испарение из него влаги, и число  $Rb \ll 1$ . Экспериментально установлено, что при конвективной сушке натуральной кожи максимальные величины числа  $Rb \approx 0,1 \div 0,15$  при  $\bar{u} \rightarrow u_p$  (где  $u_p$  – равновесное влагосодержание материала) [4, 5].

Пренебрегая величиной числа  $Rb$ , при малых его значениях запишем

$$q_{II} = q_I \cdot N^* = r \cdot \rho \cdot R_V \cdot N \cdot N^*. \quad (2)$$

Относительная скорость сушки  $N^*$  – обобщенный комплексный параметр, не зависящий от режима сушки и являющийся лишь функцией влагосодержания материала [1, 6, 7]:

$$N^* = \frac{1}{N} \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|.$$

Скорость сушки [1–9] равна

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = K (\bar{u} - u_p), \quad (3)$$

где коэффициент сушки  $K$  зависит от вида материала и режима сушки. Решение уравнения (3) показывает, что кривая сушки является убывающей экспонентой.

В действительности кривые сушки материалов представляют две или три (в случае сушки натуральной кожи) экспоненты, сопряженные в точках с влагосодержаниями  $\bar{u}_{кр1}$ ,  $\bar{u}_{кр2}$  и  $\bar{u}_{кр3}$  [4, 5, 10]. Интенсивность испарения влаги в единицу времени с единицы поверхности влажного тела во втором периоде сушки также изменяется с течением времени по экспоненциальному закону [1–3]:

$$j_{II} = j_I \exp(-K \tau_{II}). \tag{4}$$

При этом интенсивность испарения влаги (кг/м<sup>2</sup>·с) во втором периоде сушки можно определить по более простой зависимости:

$$j_{II} = \frac{q_{II}}{r} = \rho \cdot R_V \cdot N \cdot N^*,$$

где  $j_I$  – интенсивность испарения влаги в первом периоде сушки ( $j_I = \rho \cdot R_V \cdot N$ ).

**Приближенные методы расчета кривых сушки в периоде падающей скорости.** Зависимости скорости сушки  $|d\bar{u}/d\tau| = f(\tau)$  во втором периоде имеют сложный вид [1, 3, 6]. Выбор уравнения, аппроксимирующего действительную кривую скорости сушки, определяется конкретными условиями и типом кривой скорости [1, 3, 6, 10].

А. В. Лыковым был предложен метод расчета кривой скорости сушки, когда действительная кривая скорости заменяется прямой и применяется линейная аппроксимация для зависимости (3) при постоянной величине коэффициента сушки  $K = \text{const}$  [1, 6, 7, 10].

На рис. 1; 2, *b*; 3, *b* и 4, *b* даны типичные кривые скорости сушки для разных натуральных кож, взятые из [2, 3, 5], на которых показана линейная аппроксимация кривой скорости сушки, а на рис. 2, *a* и 3, *a* изображены кривые сушки  $\bar{u} = f(\tau)$  и температурные кривые  $\bar{t} = f(\tau)$  для юфти и рантовой подошвы.

Принимая в простейшем случае линейную аппроксимацию для зависимости (3) при коэффициенте сушки  $K = \text{const}$  и в соответствии с уравнением спрямляющей прямой (см. рис. 1), интегрируя уравнение (3) при начальных условиях  $\bar{u} = \bar{u}_{кр1}$  и  $\tau = 0$ , длительность сушки (в мин) во втором периоде равна [7, 10, 11]

$$\tau_{II} = \frac{1}{K} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр1} - u_p}, \tag{5}$$

где  $\bar{u}$  – текущее влагосодержание материала,  $\bar{u}_{кр1}$  – влагосодержание при переходе первого периода сушки в период падающей скорости. Значения  $\bar{u}_p$  определяются режимом сушки (см. рис. 1).

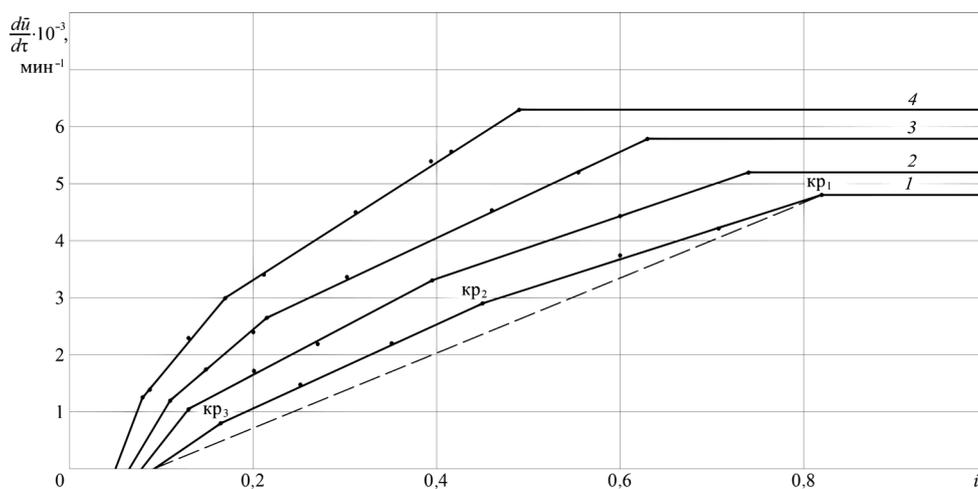


Рис. 1. Кривые скорости сушки юфти для режимов: кривая 1 –  $t_c = 40$  °С,  $v = 0,5$  м/с,  $\phi = 30$  %; кривая 2 –  $t_c = 50$  °С,  $v = 0,5$  м/с,  $\phi = 30$  %; кривая 3 –  $t_c = 50$  °С,  $v = 1,5$  м/с,  $\phi = 60$  %; кривая 4 –  $t_c = 60$  °С,  $v = 0,5$  м/с,  $\phi = 35$  %

Fig. 1. Drying speed curves of yuft for the modes: curve 1 –  $t_c = 40$  °С,  $v = 0.5$  m/s,  $\phi = 30$  %; curve 2 –  $t_c = 50$  °С,  $v = 0.5$  m/s,  $\phi = 30$  %; curve 3 –  $t_c = 50$  °С,  $v = 1.5$  m/s,  $\phi = 60$  %; curve 4 –  $t_c = 60$  °С,  $v = 0.5$  m/s,  $\phi = 35$  %

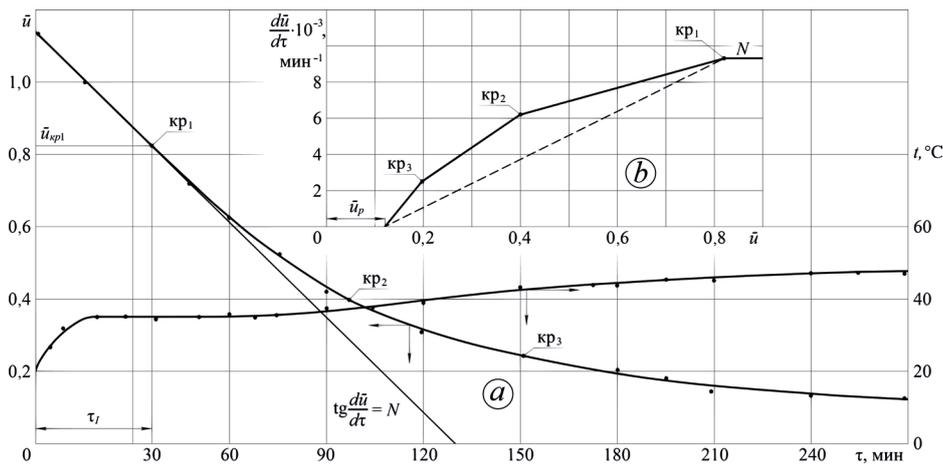


Рис. 2. Кривая сушки и температурная кривая (а), кривая скорости сушки (b) для режима сушки юфти:  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 1\text{ м/с}$ ,  $\varphi = 45\%$

Fig. 2. Drying curve and temperature curve (a), drying speed curve (b) for the drying mode of the yuft:  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 1\text{ м/с}$ ,  $\varphi = 45\%$

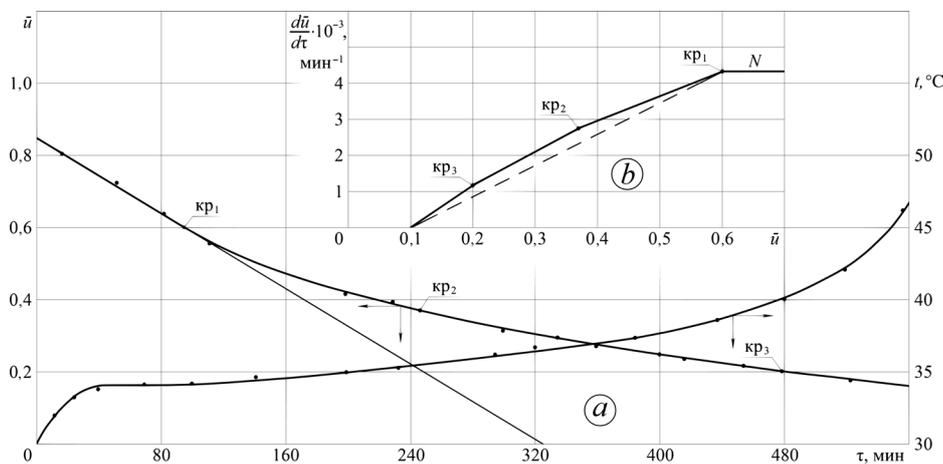


Рис. 3. Кривая сушки и температурная кривая (а), кривая скорости сушки (b) для режима сушки рантовой подошвы:  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,5\text{ м/с}$ ,  $\varphi = 50\%$

Fig. 3. Drying curve and temperature curve (a), drying speed curve (b) for the drying mode of the welt outsole:  $t_c = 50\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 0.5\text{ м/с}$ ,  $\varphi = 50\%$

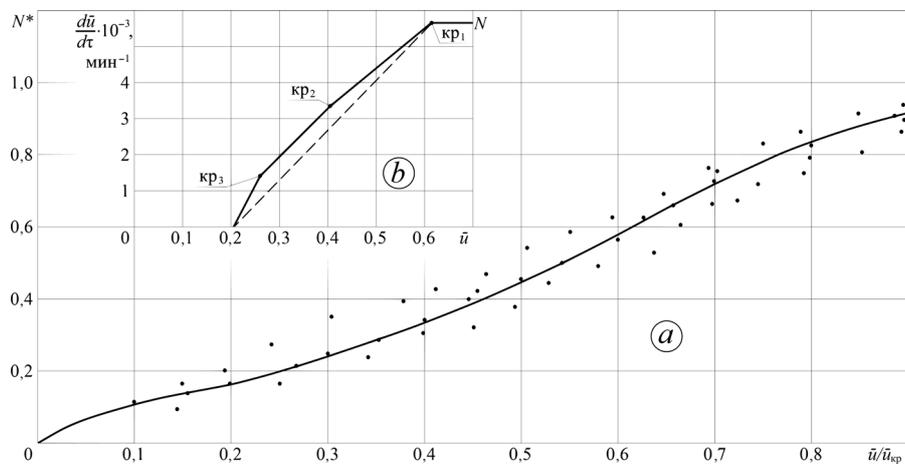


Рис. 4. Зависимость относительной скорости сушки  $N^*$  от безразмерного влагосодержания  $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$  (а) и кривая скорости сушки (b) юфти при режиме:  $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 1\text{ м/с}$ ,  $\varphi = 60\%$

Fig. 4. Dependence of the relative drying rate  $N^*$  on the dimensionless moisture content  $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$  (a) and the curve of the drying speed (b) of the yuft at the regime:  $t_c = 40\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $v = 1\text{ м/с}$ ,  $\varphi = 60\%$

При однозональном методе расчета кривой скорости сушки коэффициент сушки  $K$  (мин<sup>-1</sup>) равен приближенно [7]

$$K \approx \frac{N}{\bar{u}_{кр1} - u_p}. \quad (6)$$

С учетом времени сушки в первом периоде продолжительность процесса сушки определяется формулой [4, 5]

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{1}{N} \left( (\bar{u}_0 - \bar{u}_{кр}) - (\bar{u}_{кр} - u_p) \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right). \quad (7)$$

Скорость сушки в любой момент второго периода можно определить по величине  $N$  в первый период для любого режима сушки и величине  $N^*$  для данного влагосодержания  $\bar{u}$  по выражению [11]

$$N \cdot N^* = \left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right|. \quad (8)$$

Подставляя (8) в уравнение (3), получим выражение для коэффициента сушки  $K$

$$K = \frac{N \cdot N^*}{\bar{u} - u_p}. \quad (9)$$

В реальных условиях сушки коэффициент сушки  $K$  величина переменная, поэтому аппроксимация действительной кривой скорости сушки прямыми является приближенной.

В результате обработки и анализа более 20 кривых скорости сушки различных натуральных кож, приведенных в [2–5], авторами настоящего исследования была получена графическая зависимость  $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$ , изображенная на рис. 4, а. Видно, что кривая  $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{кр})$  повторяет форму кривой скорости сушки натуральной кожи с размытыми границами перехода от одной зоны к следующей, что объясняется множеством режимов сушки с различными значениями критических влагосодержаний по зонам сушки.

Определим расходы теплоты, подводимой к влажному образцу кожи на нагрев и на испарение из него влаги для режима сушки пластины юфти ( $200 \times 150 \times 1,7$  мм) –  $t_c = 50$  °С;  $\varphi = 45$  %;  $v = 1$  м/с;  $\rho = 520$  кг/м<sup>3</sup>;  $\bar{u}_0 = 1,13$ ;  $\bar{u}_{кон} = 0,25$ . Время сушки  $\tau = 150$  мин. Количество теплоты  $Q$  (Дж), подводимой от воздуха к образцу кожи, определяется следующим образом:

$$Q = c_{cp} \cdot \rho \cdot V \cdot (\bar{t} - t_n),$$

где  $c_{cp}$  – средняя удельная теплоемкость юфти за весь период сушки до  $\bar{u}_{кон} = 0,25$ ; объем образца  $V = 5,1 \cdot 10^{-5}$  м<sup>3</sup>; начальная температура кожи  $t_n = 20$  °С, конечная  $\bar{t}_{кон} = 42$  °С.

Удельная теплоемкость влажной кожи рассчитывается по формуле

$$c_{вл} = c_0 + c_v \cdot \bar{u},$$

где теплоемкость сухой юфти  $c_0 = 1450$  Дж/(кг·°С), теплоемкость воды  $c_v = 4200$  Дж/(кг·°С). Удельная теплоемкость юфти при  $\bar{u}_0 = 1,13$  и  $\bar{u}_{кон} = 0,25$  соответственно равны  $c_{вл1} = 6199$  Дж/(кг·°С) и  $c_{вл2} = 2500$  Дж/(кг·°С). Средняя удельная теплоемкость юфти в процессе сушки  $c_{cp} \approx 4350$  Дж/(кг·°С).

Расход теплоты на нагрев и испарение влаги из образца кожи рассчитывался следующим образом:

$$Q = 4350 \cdot 520 \cdot 5,1 \cdot 10^{-5} \cdot 22 \approx 2539 \text{ Дж.}$$

Удельный расход теплоты на единицу объема равнялся

$$Q = c_{cp} \cdot \rho \cdot (\bar{t} - t_n) = 4350 \cdot 520 \cdot 22 \approx 50 \cdot 10^6 \text{ Дж/м}^3.$$

Удельный расход теплоты на единицу поверхности определялся по выражению

$$Q = c_{cp} \cdot \rho \cdot R_V \cdot (\bar{t} - t_n) = 4350 \cdot 520 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 22 \approx 3845 \text{ Дж/м}^2.$$

Экспериментально установлено, что коэффициенты теплоотдачи  $\bar{\alpha}$  в периоде падающей скорости сушки уменьшаются со снижением влагосодержания по эмпирической формуле [1, 3, 6, 7]

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^n \quad (10)$$

Для всех натуральных кож при конвективной сушке показатель  $n = 0,6$  [4, 5].

На основе уравнения кинетики сушки и уравнений для теплового потока, скорости сушки путем обработки кривых сушки более 20 различных видов натуральных кож были установлены зависимости для отношения критериев Нуссельта по периодам сушки и для безразмерных температур [9]:

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_{\text{кр}}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{\text{кр}}} = N^{*0,57}; \quad (11)$$

$$\frac{\text{Nu}}{\text{Nu}_{\text{кр}}} \cdot \frac{t_c - t_{\text{II}}}{t_c - t_{\text{M}}} = \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p} \quad (\text{Rb} = 0), \quad (12)$$

где  $t_{\text{II}}$  – температура на поверхности материала,  $t_{\text{M}}$  – температура мокрого термометра;

$$\frac{t_c - t_{\text{II}}}{t_c - t_{\text{M}}} = N^{*0,43}. \quad (13)$$

В условиях сушки тонких материалов при малых градиентах температуры по сечению влажного тела можно принимать температуру на поверхности приблизительно равной среднеинтегральной ( $t_{\text{II}} \approx \bar{t}$ ) [6].

Подставляя в (11) уравнение (10), получим

$$N^* \approx \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{0,57} \approx \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{\text{кр}}} \right)^{1,05}. \quad (14)$$

Экспериментальная кривая  $N^* = f(\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}})$  (см. рис. 4, *a*) хорошо аппроксимируется уравнением (14). С учетом (14) уравнение (9) для коэффициента сушки примет вид

$$K = \frac{N \cdot \left( \bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}} \right)^{1,05}}{\bar{u} - u_p}. \quad (15)$$

Подставляя в однозональный метод расчета длительности сушки (5) с постоянным коэффициентом сушки  $K$  уравнение (15), получим длительность сушки при переменном значении  $K$  в процессе конвективной сушки кожи:

$$\tau \approx \frac{1}{N} \left( \left( \bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{кр}} \right) - \frac{\bar{u} - u_p}{\left( \bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}} \right)^{1,05}} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{\text{кр}} - u_p} \right). \quad (16)$$

Типичные кривые скорости сушки на рис. 1; 2, *b*; 3, *b* и 4, *b* состоят из трех зон, в каждой из которых коэффициент сушки  $K$  – постоянная величина. Принимая зональный метод обработки опытных данных В. В. Красникова [11] для процесса сушки натуральных кож, длительность сушки для кривых скорости сушки, состоящих из трех зон, определяется уравнением [4, 5, 11]

$$\tau = \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_{\text{кр}1}}{N} + \frac{1}{K_1} \ln \frac{\bar{u}_{\text{кр}1} - u_p}{\bar{u}_1 - u_p} + \frac{1}{K_2} \ln \frac{\bar{u}_{\text{кр}2} - u_p}{\bar{u}_{\text{II}} - u_p} + \frac{1}{K_3} \ln \frac{\bar{u}_{\text{кр}2} - u_p}{\bar{u}_{\text{III}} - u_p}, \quad (17)$$

где  $\bar{u}_1, \bar{u}_{\text{II}}, \bar{u}_{\text{III}}$  – влагосодержания по зонам, причем  $\bar{u}_{\text{кр}2} < \bar{u}_1 < \bar{u}_{\text{кр}1}$ ;  $\bar{u}_{\text{кр}3} < \bar{u}_{\text{II}} < \bar{u}_{\text{кр}2}$ ;  $u_p < \bar{u}_{\text{III}} < \bar{u}_{\text{кр}3}$ .

Необходимо отметить, что при сушке натуральной кожи при  $\bar{u} < 0,2$  значительная часть теплоты идет на нарушение связи влаги с материалом. Энергия связи влаги увеличивается и теплота парообразования  $r$  и массообменные коэффициенты переноса не соответствуют действительным значениям [2, 3]. Поэтому третья зона кривой сушки рассчитывается с погрешностью более 5 %.

В табл. 1 приведены результаты расчета времени сушки по формулам (7), (16) и (17) и сравнение расчетных значений с экспериментом для процессов сушки юфти и рантовой подошвы.

Погрешность в расчетах длительности сушки составляет 5–7 % и находится в пределах точности обработки опытных данных.

**Т а б л и ц а 1. Результаты расчета длительности сушки и температуры материала по формулам (7), (16), (17) и сопоставление расчетных значений с опытными для процессов сушки юфты и рантовой подошвы**

**Table 1. Results of calculation of drying time and material temperature according to the formulas (7), (16), (17) and comparison of calculated values with experimental ones for the processes of drying the yuft and welt outsoles**

Юфта хромового дубления, пластина 150 × 150 × 1,7 мм; ρ = 520 кг/м <sup>3</sup> , $\bar{u}_0 = 1,132$ , $\bar{u}_{кр1} = 0,82$ , $\bar{u}_{кр2} = 0,41$ , $\bar{u}_{кр3} = 0,22$ , $\bar{u}_p = 0,12$ . Режим сушки: $t_c = 50$ °С, φ = 45 %, v = 1 м/с. N = 9,8·10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup> , j <sub>1</sub> = 1,42·10 <sup>-3</sup> кг/(м <sup>2</sup> ·с), t <sub>m</sub> = 35 °С, τ <sub>1</sub> = 32 мин, K <sub>1</sub> ≈ 0,0148 мин <sup>-1</sup> , K <sub>2</sub> ≈ 0,017 мин <sup>-1</sup> , K <sub>3</sub> ≈ 0,028 мин <sup>-1</sup>								
$\bar{u}$	$\bar{u}/\bar{u}_{кр}$	τ, мин (экс.)	τ, мин (7)	τ, мин (16)	τ, мин (17)	t, °С (экс.)	t, °С (21)	t, °С (23)
0,7	0,85	45	46,5	46,5	48,5	35,5	35,3	36,0
0,6	0,73	60	60,4	60,2	63,2	36,5	36,5	37,0
0,5	0,61	75	77,4	75,2	74,8	37,0	37,2	38,1
0,4	0,48	98	101,5	99,5	96,6	38,5	39,0	39,1
0,3	0,36	123	126,6	123,4	124,6	39,5	39,5	40,2
0,25	0,30	150	153,3	150,3	150,8	41,5	42,0	41,4
Рантовая подошва, пластина 250 × 150 × 4,2 мм; ρ = 950 кг/м <sup>3</sup> , $\bar{u}_0 = 0,86$ , $\bar{u}_{кр1} = 0,62$ , $\bar{u}_{кр2} \approx 0,39$ , $\bar{u}_{кр3} \approx 0,19$ , $\bar{u}_p = 0,1$ . Режим сушки: t <sub>c</sub> = 50 °С, φ = 50 %, v = 0,5 м/с. N = 2,32·10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup> , j <sub>1</sub> = 9,18·10 <sup>-3</sup> кг/(м <sup>2</sup> ·с), t <sub>m</sub> = 34 °С, τ <sub>1</sub> = 92 мин, K <sub>1</sub> ≈ 0,005 мин <sup>-1</sup> , K <sub>2</sub> ≈ 0,0063 мин <sup>-1</sup> , K <sub>3</sub> ≈ 0,0086 мин <sup>-1</sup>								
$\bar{u}$	$\bar{u}/\bar{u}_{кр}$	τ, мин (экс.)	τ, мин (7)	τ, мин (16)	τ, мин (17)	t, °С (экс.)	t, °С (21)	t, °С (23)
0,5	0,83	142	138,8	136,9	136,6	35,0	35,4	35,3
0,4	0,67	204	202	197,3	198,4	36,5	37,0	36,7
0,3	0,50	290	287,7	286,7	287,0	38,0	38,5	38,3
0,25	0,416	350	346,4	356,0	346,4	39,0	39,5	39,2
0,20	0,333	468	466,5	–	459,6	42,0	41,6	41,2

На основе обработки опытных данных по конвективной сушке различных капиллярно-пористых материалов Н. С. Михеевой [3] было получено простое уравнение для определения времени сушки, включая первый и второй периоды сушки, без необходимости определения критического влагосодержания материала.

Уравнение Н. С. Михеевой применительно для сушки натуральной кожи имеет вид

$$\tau = \frac{1,8}{N} \left( (\bar{u}_0 - u_p) - 0,56\bar{u}_0 \right) \ln \left( \frac{\bar{u}_0}{\bar{u} - u_p} \right). \tag{18}$$

В табл. 2 даны расчеты времени сушки по формуле Н. С. Михеевой для различных натуральных кож.

Температура в периоде падающей скорости сушки определяется из уравнений (12) и (13), принимая  $t_{п} \approx \bar{t}$  и числа Rb = 0.

Учитывая отношение

$$\frac{Nu}{Nu_{кр}} = \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right),$$

**Т а б л и ц а 2. Результаты расчета длительности сушки по формуле Н. С. Михеевой для различных видов натуральной кожи**

**Table 2. Results of calculation of drying time according to the formula of N. S. Mikheeva for different types of natural leather**

Юфта хромового дубления, пластина 200 × 150 × 1,7 мм; ρ = 520 кг/м <sup>3</sup> . Режим сушки: t <sub>c</sub> = 50 °С, φ = 45 %, v = 1 м/с; $\bar{u}_0 = 1,13$ , $\bar{u}_{кр} = 0,82$ , $u_p = 0,12$ , N = 9,8·10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup>			Рантовая подошва, пластина 200 × 200 × 4,2 мм; ρ = 980 кг/м <sup>3</sup> . Режим сушки: t <sub>c</sub> = 60 °С, φ = 50 %, v = 0,5 м/с; $\bar{u}_0 = 0,78$ , $\bar{u}_{кр} = 0,6$ , $u_p = 0,12$ , N = 1,9·10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup>		
$\bar{u}$	τ, мин (экс.)	τ, мин (форм.)	$\bar{u}$	τ, мин (экс.)	τ, мин (форм.)
0,7	45	44,9	0,6	95	94,5
0,6	60	57,8	0,53	132	135,7
0,5	75	73,6	0,45	174	177,8
0,4	98	96,4	0,37	222	225,6
0,3	123	121,5	0,30	282	279,7
0,25	150	146,6	0,25	362	358,5

Стелечный полувал, пластина 200 × 150 × 2,8 мм; ρ = 700 кг/м <sup>3</sup> . Режим сушки: t <sub>c</sub> = 60 °С, φ = 60 %, v = 1 м/с, $\bar{u}_0 = 1,13$ , $\bar{u}_{кр} = 0,78$ , u <sub>p</sub> = 0,13, N = 8 · 10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup>			Хромовый опоек, пластина 150 × 80 × 0,9 мм; ρ = 450 кг/м <sup>3</sup> . Режим сушки: t <sub>c</sub> = 50 °С, φ = 27 %, v = 1,5 м/с, $\bar{u}_0 = 1,6$ , $\bar{u}_{кр} = 0,85$ , u <sub>p</sub> = 0,11, N = 11,3 · 10 <sup>-3</sup> мин <sup>-1</sup>		
$\bar{u}$	τ, мин (экс.)	τ, мин (форм.)	$\bar{u}$	τ, мин (экс.)	τ, мин (форм.)
0,9	32	31,6	1,2	34	32,4
0,7	59	56,5	1,0	53	49,5
0,5	92	92,4	0,8	74	71,4
0,4	118	118,5	0,6	105	103,4
0,25	191	188,2	0,4	140	143,3
–	–	–	0,25	195	198,3

запишем уравнение (12) следующим образом (принимая u<sub>p</sub> = 0):

$$\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0 - u_p} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_m} \cdot \frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_{кр}} = \frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_m} \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right); \quad (19)$$

$$\frac{t_c - \bar{t}}{t_c - t_m} \approx \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n} \approx \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{1-n} \approx \left( \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right)^{1-n}. \quad (20)$$

При конвективной сушке натуральной кожи при температурах t<sub>c</sub> = 40–60 °С и высокой относительной влажности воздуха φ = 30–80 % необходимо учитывать равновесное влагосодержание (u<sub>p</sub> = 0,1–0,18).

Среднеинтегральная температура в процессе сушки кожи из уравнения (20) равна

$$\bar{t} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left( \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p} \right)^{0,4}. \quad (21)$$

Среднеинтегральная температура материала из уравнения (13) определяется зависимостью

$$\bar{t} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot N^{*0,43}. \quad (22)$$

Подставляя в (22) отношение (14), получим

$$\bar{t} \approx t_c - (t_c - t_m) \cdot \left( \frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} \right)^{0,45}. \quad (23)$$

Различие в показателях степени в уравнениях (21) и (23) показывает погрешность обработки опытных данных по разным методам, но разброс значений температур по формулам находится в пределах 5 %.

Значения интегральных температур по уравнениям (21) и (23) и сравнение с экспериментом приведены в табл. 1.

**Заключение.** Таким образом, уравнения кинетики сушки позволяют получить основные формулы для расчета кинетики сушки натуральной кожи, выявить общую закономерность протекания процесса сушки при различных методах аппроксимации действительной кривой скорости сушки. Полученные приближенные уравнения дают возможность оценить протекание процесса сушки при изменении режима и определить главные кинетические характеристики – время сушки и температуру материала в периоде падающей скорости. Приближенные уравнения, полученные на основе обработки действительных кривых скорости сушки, имеют практическое значение при расчетах кинетики сушки и позволяют оценить количественные изменения, вызванные изменением режима сушки.

#### Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 590 с.
2. Лыков, А. В. Кинетика и динамика процессов сушки и увлажнения / А. В. Лыков. – М.: Гизлегпром, 1938. – 776 с.

3. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
4. Ольшанский, А. И. Кинетика тепловлагообмена и метод расчета длительности конвективной сушки натуральной кожи / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев // Вестн. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2020. – Т. 65, № 4. – С. 464–475. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>
5. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики конвективной сушки натуральных кож / А. И. Ольшанский, А. Л. Климентьев, В. В. Петренко // Вестн. Витеб. гос. технол. ун-та – 2018. – № 1 (34). – С. 49–62.
6. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Белорус. наука, 2010. – 443 с.
7. Рудобашта, С. П. Массотеплоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
8. Куц, П. С. Некоторые закономерности тепловлагообмена и приближенные методы расчета кинетики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1977. – Т. 32, № 6. – С. 1007–1014.
9. Лыков, А. В. Кинетика теплообмена в процессе сушки влажных материалов / А. В. Лыков, П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1972. – Т. 23, № 3. – С. 401–406.
10. Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
11. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.

## References

1. Lykov A. V. *Drying Theory*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 590 p. (in Russian).
2. Lykov A. V. *Kinetics and Dynamics of Drying and Humidification Processes*. Moscow, Gizlegprom Publ., 1938. 776 p. (in Russian).
3. Kavkazov Y. L. *Heat and Mass Transfer in Leather and Footwear Technology*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
4. Olshansky A. I., Klimentiev A. L. Heat and moisture exchange kinetics and method for calculating the duration of convective drying of natural leather. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2020, vol. 65, no. 4, pp. 464–475 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2020-65-4-464-475>
5. Olshansky A. I., Klimentiev A. L., Petrenko V.V. Study of kinetics of convective drying of natural leathers. *Vestnik Vitebskogo gosudarstvennogo tehnologicheskogo universiteta = Bulletin of Vitebsk State Technological University*, 2018, no. 1 (34), pp. 49–62 (in Russian).
6. Akulich P. V. *Calculations Drying and Heat Exchange Systems*. Minsk, Belorusskaya nauka Publ., 2010. 444 p. (in Russian).
7. Rudobashta S. P. *Mass-Heat Transfer in Solid-Phase Systems*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
8. Kuts P. S., Olshansky A. I. Some features of heat and moisture transfer and approximate methods of calculating the drying kinetics of moist materials. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = Journal of Engineering Physics*, 1977, vol. 32, no. 6, pp. 1007–1014 (in Russian).
9. Lykov A. V., Kuts P. S., Olshansky A. I. Heat transfer kinetics in the process of wet materials drying. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = Journal of Engineering Physics*, 1972, vol. 23, no. 3, pp. 401–406 (in Russian).
10. Sazhin B. S. *Fundamentals of Drying Technique*. Moscow, Khimiya Publ., 1984. 320 p. (in Russian).
11. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1973. 288 p. (in Russian).

## 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: tiomp@vstu.by

Котов Алексей Анатольевич – ассистент кафедры «Теплоэнергетика», Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

Кузьменков Сергей Михайлович – ассистент кафедры «Технология машиностроения», Витебский государственный технологический университет (Московский пр., 72, 210035, Витебск, Республика Беларусь). E-mail: tiomp@vstu.by

## Information about the authors

Anatolii I. Ol'shanskii – 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: tiomp@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: tiomp@vstu.by

Sergey M. Kuzmenkov – Assistant at the Department of Mechanical Engineering, Vitebsk State Technological University (72, Moskovsky Ave., 210035, Vitebsk, Republic of Belarus). E-mail: tiomp@vstu.by

## РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

### RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

УДК 621.382.3:539.12.04

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-402-408>

Поступила в редакцию 17.06.2022

Received 17.06.2022

Ю. В. Богатырев<sup>1</sup>, Д. А. Огородников<sup>1</sup>, С. Б. Ластовский<sup>1</sup>, А. В. Кетько<sup>2</sup>,  
М. М. Кречко<sup>2</sup>, С. В. Шпаковский<sup>2</sup>, П. В. Рубанов<sup>3</sup>, Г. А. Протопопов<sup>4</sup>, П. А. Чубунов<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Филиал НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,  
Минск, Республика Беларусь

<sup>3</sup>АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

<sup>4</sup>Филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения»,  
Москва, Российская Федерация

## ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ *p*-КАНАЛЬНЫХ МОП-ТРАНЗИСТОРОВ

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментальных исследований влияния гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  на основные параметры кремниевых эпитаксиально-планарных *p*-канальных МОП-транзисторов при различных электрических режимах. Транзисторы изготовлены по радиационно-стойкой ДМОП-технологии с проектными нормами 1,4 мкм. В результате исследований транзисторов установлено: значения всех основных параметров после дозы облучения  $D = 10^6$  рад ( $\text{SiO}_2$ ) в активных электрических режимах облучения остались в пределах критериев работоспособности; наиболее чувствительным к воздействию дозы облучения гамма-квантами является пороговое напряжение; в пассивном электрическом режиме облучения стойкость транзисторов по всем параметрам соответствует дозе  $2,8 \cdot 10^6$  рад ( $\text{SiO}_2$ ). Показано, что разная степень радиационной деградации исследуемых параметров при облучении обусловлена их зависимостью либо от эффектов ионизации в слоях подзатворных и изолирующих диэлектриков, либо от структурных нарушений в объемном кремнии активных областей транзисторов. Высокая радиационная стойкость исследованных *p*-канальных МОП-транзисторов позволяет рекомендовать их для использования в аппаратуре авиационной и космической техники.

**Ключевые слова:** *p*-канальный МОП-транзистор, гамма-излучение, радиационная стойкость, доза облучения, электрический режим

**Для цитирования:** Влияние ионизирующего излучения на параметры *p*-канальных МОП-транзисторов / Ю. В. Богатырев [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 402–408. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-402-408>

Yuri V. Bogatyrev<sup>1</sup>, Dzmitryi A. Aharodnikau<sup>1</sup>, Stanislav B. Lastovsky<sup>1</sup>, Aleksandr V. Ket'ko<sup>2</sup>,  
Mikhail M. Krechko<sup>2</sup>, Sergey V. Shpakovsky<sup>2</sup>, Pavel V. Rubanov<sup>3</sup>, Grigory A. Protopopov<sup>4</sup>, Pavel A. Chubunov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL”,  
Republic of Belarus

<sup>3</sup>JSC “Russian Space Systems”, Moscow, Russian Federation

<sup>4</sup>Branch of JSC “United Rocket and Space Corporation” – “Research Institute of Space Instrumentation”,  
Moscow, Russian Federation

## INFLUENCE OF IONIZING RADIATION ON THE PARAMETERS OF *p*-CHANNEL MOS TRANSISTORS

**Abstract.** The results of experimental studies of the influence of gamma radiation  $\text{Co}^{60}$  on the basic parameters of silicon epitaxial-planar *p*-channel MOSFET transistors under different electrical modes are presented. Transistors were manufactured according to radiation-resistant DMOS technology with design standards of 1.4  $\mu\text{m}$ . As a result of transistor studies, it was established that the values of all basic parameters after the radiation dose  $D = 10^6$  rads ( $\text{SiO}_2$ ) in active electrical irradiation modes remained within the limits of the performance criteria; the parameter, most sensitive to influence of a dose of irradiation

tion by gamma-quanta is the threshold voltage; in the passive electrical irradiation mode the transistor's radiations resistance in all parameters corresponds to a dose of  $2,8 \cdot 10^6$  rads ( $\text{SiO}_2$ ). A sufficiently high radiation resistance of the studied *p*-channel MOSFETs makes it possible to recommend them for use in aviation and space equipment. The different degrees of radiation degradation of the studied parameters during irradiation are due to their dependence either on the effects of ionization in the layers of sub-gate and insulating dielectrics, or structural damage in the bulk silicon of the transistor active regions. The high radiation resistance of the studied *p*-channel MOSFETs allows recommending them for use in aviation and space equipment.

**Keywords:** *p*-channel MOSFET transistor, gamma radiation, radiation resistance, radiation dose, electrical mode

**For citation:** Bogatyrev Yu. V., Aharodnikau D. A., Lastovsky S. B., Ketko A. V., Krechko M. M., Shpakovsky S. V., Rubanov P. V., Protopopov G. A., Chubunov P. A. Influence of ionizing radiation on the parameters of *p*-channel MOS transistors. *Vestsi Natsyonal'noi akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 402–408 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-402-408>

**Введение.** В настоящее время изделия электронной техники широко применяются в условиях воздействия ионизирующих излучений естественного и искусственного происхождения в промышленных, военных и космических объектах [1–3]. Поэтому обеспечение радиационной стойкости радиоэлектронной аппаратуры является актуальной задачей.

Радиационные эффекты в структурах металл–оксид–полупроводник (МОП) (ионизация, накопление объемного заряда в диэлектрике, образование поверхностных состояний на границе раздела Si– $\text{SiO}_2$ ) приводят к деградации электрических характеристик МОП-приборов [4–9]. Изучение характера этой деградации и ее зависимости от электрического состояния прибора представляет научный интерес и позволяет проводить конструкторско-технологическую оптимизацию изделий электронной техники спецназначения.

*Цель данной работы* – исследование влияния гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  на основные параметры кремниевых эпитаксиально-планарных *p*-канальных МОП-транзисторов при различных электрических режимах, определение их радиационной стойкости (по накопленной дозе).

**Методика исследований.** Объектом исследований являлись экспериментальные образцы кремниевых эпитаксиально-планарных МОП-транзисторов с обогащенным *p*-каналом и встроенным обратным смещенным диодом в малогабаритном металлокерамическом корпусе КТ-99-1 (аналог BSS84W). Транзисторы изготовлены по радиационно-стойкой ДМОП-технологии (методом двойной диффузии) [10] с проектными нормами 1,4 мкм.

На рис. 1 приведен разрез структуры кристалла исследуемого *p*-канального МОП-транзистора, где указаны конструктивные слои кристалла и его конструктивные области, меняющие свои свойства под воздействием облучения.

Основные параметры транзисторов: максимальное напряжение сток-исток  $U_{\text{СИ max}} = -50$  В; максимальный постоянный ток стока  $I_{\text{C max}} = -130$  мА.

Облучение образцов транзисторов гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  с энергией 1,25 МэВ осуществлялось на установке «Исследователь» при температуре 300 К. Мощность дозы гамма-излучения составляла 8 рад ( $\text{SiO}_2$ )/с, доза  $D = 3 \cdot 10^4 \div 2,8 \cdot 10^6$  рад ( $\text{SiO}_2$ ). Дозиметрия гамма-излучения проводилась образцовыми твердотельными стеклянными детекторами ДТС-0.01/1.0 с погрешностью  $\pm 7\%$ .

В процессе накопления дозы транзисторы находились в трех электрических режимах: 1) напряжение сток-исток  $U_{\text{СИ}} = 0$  В, напряжение затвор-исток  $U_{\text{ЗИ}} = -20$  В; 2)  $U_{\text{СИ}} = -50$  В,  $U_{\text{ЗИ}} = 0$  В; 3) пассивный режим ( $U_{\text{СИ}} = 0$  В,  $U_{\text{ЗИ}} = 0$  В).

Определение параметров транзисторов проводилось с помощью автоматизированного измерителя параметров полупроводниковых приборов ИППП-1/6.

**Результаты экспериментальных исследований.** Основные результаты влияния гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  на параметры МОП-транзисторов при различных электрических режимах приведены в таблице.

В результате исследований транзисторов установлено (см. таблицу):

значения всех исследуемых параметров после дозы облучения  $D = 10^6$  рад ( $\text{SiO}_2$ ) в активных электрических режимах облучения остались в пределах критериев работоспособности;

наиболее чувствительным к воздействию дозы облучения гамма-квантами  $\text{Co}^{60}$  является параметр  $U_{\text{ЗИ пор}}$  (пороговое напряжение затвор-исток);

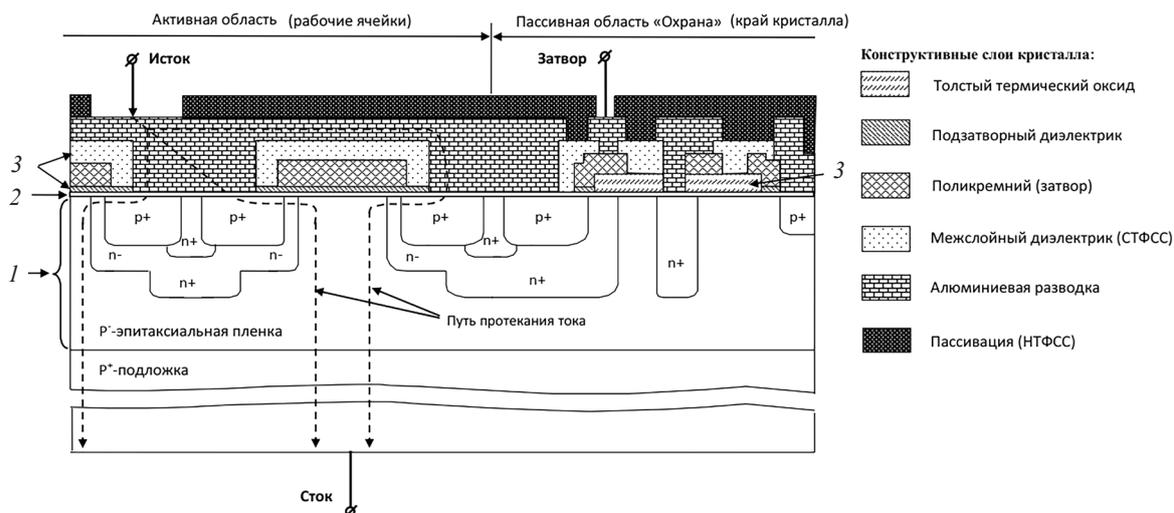


Рис. 1. Разрез структуры кристалла  $p$ -канального МОП-транзистора. Цифрами обозначены конструктивные области кристалла, меняющие свои свойства под воздействием облучения: 1 – кремниевая эпитаксиальная пленка – эффект ионизации; 2 – граница раздела Si–SiO<sub>2</sub> – эффект образования поверхностных состояний; 3 – слои термического и пиролитического SiO<sub>2</sub> – эффект накопления объемного заряда в диэлектрике

Fig. 1. A cross-section of the crystal structure of a  $p$ -channel MOSFET transistor. The numbers indicate the structural regions of the crystal that change their properties under the influence of irradiation: 1 – silicon epitaxial film – ionization effect; 2 – interface Si–SiO<sub>2</sub> – the effect of the formation of surface states; 3 – layers of thermal and pyrolytic SiO<sub>2</sub> – the effect of accumulation of bulk charge in the dielectric

в пассивном электрическом режиме облучения стойкость транзисторов по всем параметрам соответствует дозе  $2,8 \cdot 10^6$  рад (SiO<sub>2</sub>).

На рис. 2 представлены дозовые зависимости изменения порогового напряжения  $\Delta U_{\text{зи пор}}$   $p$ -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах.

Установлено, что с увеличением дозы облучения происходит рост по абсолютной величине самого  $U_{\text{зи пор}}$  и, соответственно, его изменения  $\Delta U_{\text{зи пор}}$ . Рост  $|U_{\text{зи пор}}|$ ,  $|\Delta U_{\text{зи пор}}|$  замедляется при больших дозах облучения.

В диапазоне доз до  $D = 3 \cdot 10^5$  рад (SiO<sub>2</sub>) существенного отличия между различными электрическими режимами в процессе облучения по степени влияния на величину  $\Delta U_{\text{зи пор}}$  не обнару-

#### Критерии работоспособности и основные результаты измерения параметров транзисторов после набора соответствующей дозы при различных электрических режимах

#### Performance criteria and main results of measuring transistor parameters after the appropriate dose is received under various electrical modes

Наименование параметра (режимы измерения)	Критерий работоспособности		Результаты измерения параметров до и после облучения при различных электрических режимах						
	не менее	не более	$U_{\text{си}} = 0 \text{ В}, U_{\text{зи}} = -20 \text{ В}$		$U_{\text{си}} = -50 \text{ В}, U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$		$U_{\text{си}} = 0 \text{ В}, U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$ (пассивный режим)		
			$D = 0$	$10^6$ рад (SiO <sub>2</sub> )	$D = 0$	$10^6$ рад (SiO <sub>2</sub> )	$D = 0$	$10^6$ рад (SiO <sub>2</sub> )	$2,8 \cdot 10^6$ рад (SiO <sub>2</sub> )
Начальный ток стока, $I_{\text{с нач}}$ , мА ( $U_{\text{си}} = -50 \text{ В}, U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}$ )	–	$ -3,0 $	$-9,48 \times 10^{-6}$	$-4,49 \times 10^{-6}$	$-2,8 \times 10^{-6}$	$-6,9 \times 10^{-7}$	$-5,2 \times 10^{-6}$	$-2,36 \times 10^{-6}$	$-2,67 \times 10^{-6}$
Ток утечки затвора, $I_{\text{з ут}}$ , нА ( $U_{\text{си}} = 0 \text{ В}, U_{\text{зи}} = \pm 20 \text{ В}$ )	–	$ \pm 100 $	+8,68 –10,06	+0,42 –2,23	+0,59 –2,76	+1,33 –0,82	+3,13 –1,42	+0,05 –2,03	+0,36 –1,67
Пороговое напряжение, $U_{\text{зи пор}}$ , В ( $U_{\text{си}} = U_{\text{зи}}, I_{\text{с}} = -1 \text{ мА}$ )	$ -0,5 $	$ -2,75 $	–1,84	–2,23	–1,85	–2,14	–1,89	–2,18	–2,4
Сопротивление сток-исток в открытом состоянии, $R_{\text{си отк}}$ , Ом ( $U_{\text{зи}} = -5 \text{ В}, I_{\text{с}} = -0,1 \text{ А}$ )	–	12	6,26	6,56	6,27	6,81	6,34	6,72	6,98
Постоянное прямое напряже- ние диода, $U_{\text{пр}}$ , В ( $U_{\text{зи}} = 0 \text{ В}, I_{\text{с}} = 0,1 \text{ А}$ )	–	1,8	0,855	0,858	0,855	0,854	0,855	0,856	0,862

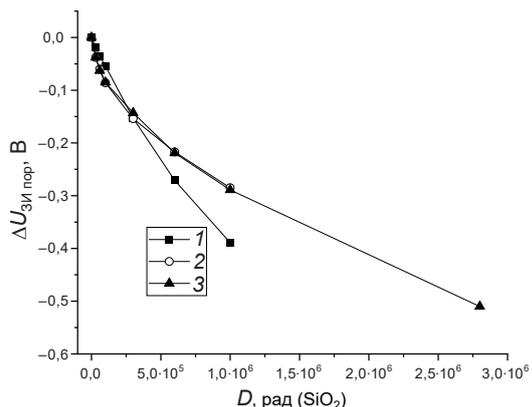


Рис. 2. Дозовые зависимости изменения порогового напряжения  $\Delta U_{зи пор}$   $p$ -канальных МОП транзисторов, облучаемых гамма-квантами  $Co^{60}$  в различных электрических режимах: кривая 1 –  $U_{СИ} = 0$  В,  $U_{ЗИ} = -20$  В; кривая 2 –  $U_{СИ} = -50$  В,  $U_{ЗИ} = 0$  В; кривая 3 – пассивный электрический режим

Fig. 2. Dose dependencies of changes in the threshold voltage  $\Delta U_{GS\ threshold}$  of  $p$ -channel MOSFETs irradiated by gamma-ray quanta  $Co^{60}$  in various electrical modes: curve 1 –  $U_{SD} = 0$  V,  $U_{GS} = -20$  V; curve 2 –  $U_{SD} = -50$  V,  $U_{GS} = 0$  V; curve 3 – passive electric mode

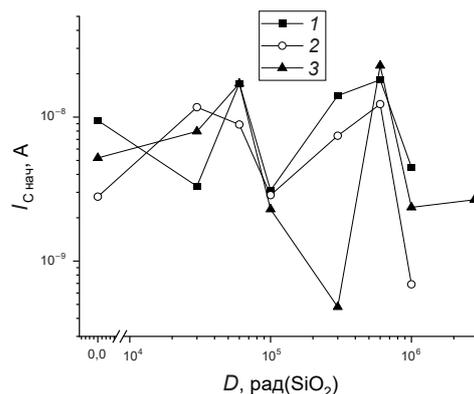


Рис. 3. Дозовые зависимости начального тока стока  $p$ -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах гамма-квантами  $Co^{60}$ . Режимы облучения: кривая 1 –  $U_{СИ} = 0$  В,  $U_{ЗИ} = -20$  В; кривая 2 –  $U_{СИ} = -50$  В,  $U_{ЗИ} = 0$  В; кривая 3 – пассивный электрический режим

Fig. 3. Dose dependencies of changes in the initial drain current of  $p$ -channel MOSFETs irradiated by gamma-ray quanta  $Co^{60}$  in various electrical modes: curve 1 –  $U_{SD} = 0$  V,  $U_{GS} = -20$  V; curve 2 –  $U_{SD} = -50$  V,  $U_{GS} = 0$  V; curve 3 – passive electric mode

жено. При дозе  $D = 10^6$  рад ( $SiO_2$ ) максимальный уровень  $|\Delta U_{зи пор}|$  зафиксирован для режима  $U_{СИ} = 0$  В,  $U_{ЗИ} = -20$  В (0,44 В против 0,31 В на других режимах).

На рис. 3 представлены дозовые зависимости начального тока стока  $p$ -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах гамма-квантами  $Co^{60}$ . Видно, что значения  $I_{C нач}$  после облучения не превысили 20–30 нА при критерии работоспособности не более 3 мА. После анализа результатов становится ясно, что режим облучения особо не влияет на данный параметр. Следовательно, можно заключить, что по параметру «начальный ток стока» ( $I_{C нач}$ ) радиационная стойкость транзисторов во всех электрических режимах испытаний соответствует дозе  $10^6$  рад.

На рис. 4 показаны дозовые зависимости сопротивления сток-исток в открытом состоянии ( $R_{СИ отк}$ )  $p$ -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах. Критерий работоспособности по данному параметру составляет не более 12 Ом. Все полученные значения не превышают 7 Ом. Более критичным для параметра  $R_{СИ отк}$  транзисторов является режим облучения при  $U_{СИ} = -50$  В,  $U_{ЗИ} = 0$  В. По параметру  $R_{СИ отк}$  радиационная стойкость транзисторов во всех электрических режимах испытаний соответствует дозе  $10^6$  рад ( $SiO_2$ ).

Дозовые зависимости постоянного прямого напряжения диода ( $U_{пр}$ )  $p$ -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах, представлены на рис. 5. Критерий работоспособности по данному параметру составляет не более 1,8 В. Полученные результаты показывают, что значение  $U_{пр}$  всех образцов при дозе  $D = 10^6$  рад ( $SiO_2$ ) не превышает 0,86 В. По параметру  $U_{пр}$  радиационная стойкость транзисторов во всех электрических режимах испытаний соответствует дозе  $10^6$  рад ( $SiO_2$ ).

По накопленной дозе радиационные эффекты делят на ионизационные и структурные [1–5]. Ионизационные связаны с накоплением заряда в диэлектрических слоях и увеличением плотности поверхностных состояний на границах раздела полупроводник–диэлектрик. Структурные эффекты обусловлены смещением атомов из узлов кристаллической решетки кремния. Основная доля энергии проникающих излучений при взаимодействии с твердыми телами тратится на ионизационные эффекты.

Из всех исследуемых в данной работе параметров  $p$ -канальных МОП-транзисторов пороговое напряжение  $U_{зи пор}$  в наибольшей степени определяется состоянием подзатворного диэлектрика и границы раздела  $Si-SiO_2$ , чем и вызвана высокая чувствительность данного параметра к поглощенной дозе гамма-квантов. Общим в характере зависимостей  $\Delta U_{зи пор}(D)$  является отри-

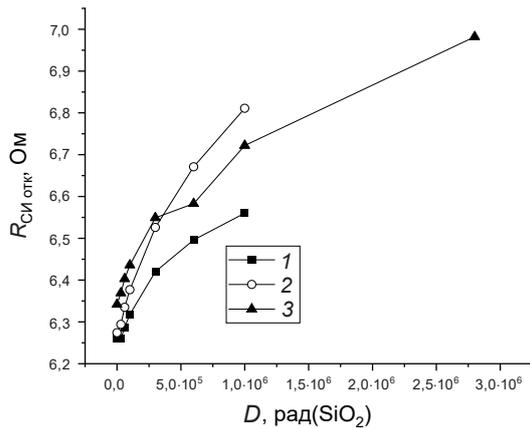


Рис. 4. Дозовые зависимости сопротивления сток-исток в открытом состоянии  $R_{СИ\text{отк}}$   $p$ -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах гамма-квантами  $Co^{60}$ . Режимы облучения: кривая 1 –  $U_{СИ} = 0$  В,  $U_{ЗИ} = -20$  В; кривая 2 –  $U_{СИ} = -50$  В,  $U_{ЗИ} = 0$  В; кривая 3 – пассивный электрический режим

Fig. 4. Dose dependencies of changes in the resistance of the drain-source in the open state of  $p$ -channel MOSFETs irradiated by gamma-ray quanta  $Co^{60}$  in various electrical modes: curve 1 –  $U_{SD} = 0$  V,  $U_{GS} = -20$  V; curve 2 –  $U_{SD} = -50$  V,  $U_{GS} = 0$  V; curve 3 – passive electric mode

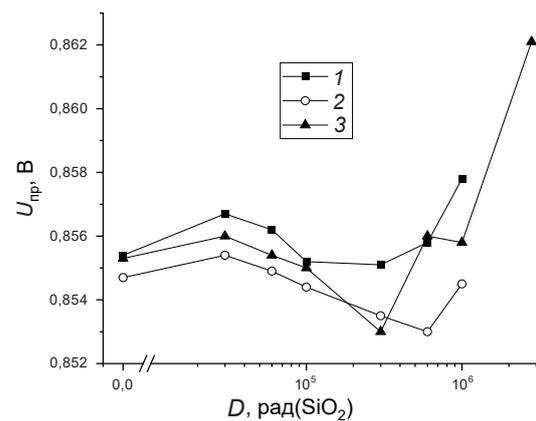


Рис. 5. Дозовые зависимости постоянного прямого напряжения диода  $U_{пр}$   $p$ -канальных МОП-транзисторов, облучаемых в различных электрических режимах гамма-квантами  $Co^{60}$ . Режимы облучения: кривая 1 –  $U_{СИ} = 0$  В,  $U_{ЗИ} = -20$  В; кривая 2 –  $U_{СИ} = -50$  В,  $U_{ЗИ} = 0$  В; кривая 3 – пассивный электрический режим

Fig. 5. Dose dependencies of changes in the direct voltage diode of  $p$ -channel MOSFETs irradiated by gamma-ray quanta  $Co^{60}$  in various electrical modes: curve 1 –  $U_{SD} = 0$  V,  $U_{GS} = -20$  V; curve 2 –  $U_{SD} = -50$  V,  $U_{GS} = 0$  V; curve 3 – passive electric mode

цательное значение  $\Delta U_{ЗИ\text{пор}}$  (сдвиг пороговых напряжений в сторону более отрицательных значений), что обусловлено захватом свободных носителей заряда (дырок) на глубокие центры (ловушки) в объеме подзатворного  $SiO_2$ , а также увеличением плотности поверхностных состояний (ПС) на границе раздела  $Si-SiO_2$  [4–7]. В случае  $p$ -канальных МОП-транзисторов индуцируемые облучением заряд в ПС и заряд в объеме диэлектрика совпадают по знаку (положительному).

Ток утечки затвора ( $I_{3\text{YT}}$ , см. таблицу) определяется электрическими характеристиками подзатворного и изолирующего диэлектриков, на проводимость которых оказывает заметное влияние накопленный заряд. Наблюдаемые нами незначительные изменения значений  $I_{3\text{YT}}$  при облучении вызваны, вероятно, накоплением положительного объемного фиксированного заряда, приводящего к уменьшению высоты и толщины потенциального барьера на границе диэлектрической пленки, что способствует эмиссии в нее электронов [1].

Такие параметры исследуемых транзисторов, как начальный ток стока, сопротивление сток-исток в открытом состоянии и постоянное прямое напряжение диода, определяются прежде всего объемными свойствами полупроводникового материала. Сопротивление объемного кремния с увеличением дозы облучения возрастает в результате введения радиационных дефектов, которые являются ловушками захвата и рассеивающими центрами для свободных носителей заряда [2, 4]. Так, на рис. 1 показаны пути прохождения тока стока. Видно, что значение  $R_{СИ\text{отк}}$  определяется сопротивлениями эпитаксиального  $p$ -Si и  $p$ -канала. Следовательно, наблюдаемое в ходе исследования незначительное монотонное увеличение значения  $R_{СИ\text{отк}}$  с ростом дозы облучения обусловлено радиационными дефектами, вводимыми в слой эпитаксиального  $p$ -Si и область  $p$ -канала (см. рис. 4). Слабость наблюдаемого эффекта связана с незначительной концентрацией введенных дефектов при используемых в данной работе дозах гамма-квантов.

Радиационные дефекты представляют собой генерационно-рекомбинационные центры в активных областях приборных структур [2, 4]. Начальный ток стока определяется в значительной степени обратными токами утечки встроенного диода, который образован слоями  $n^+$ -Si,  $p$ -Si и  $p^+$ -Si (см. рис. 1). Радиационные дефекты в менее легированном базовом слое  $p$ -Si выступают основными центрами генерации электронно-дырочных пар в области пространственного заряда обратно-смещенного диода. Из зависимостей  $I_{C\text{нач}}(D)$  можно заключить, что особых изменений измеряемый параметр в диапазоне исследуемых доз гамма-квантов не претерпевает, так как наблюдаются лишь незначительные немонотонные изменения его значений. Это может быть свя-

зано с малостью концентрации введенных радиационных дефектов, либо типы вводимых дефектов не являются эффективными центрами генерации электронно-дырочных пар (например, их глубокие уровни расположены далеко от середины запрещенной зоны кремния).

С зависимостями  $I_{C\text{нач}}(D)$  согласуются и зависимости постоянного прямого напряжения диода от дозы гамма-квантов (см. рис. 5). Здесь также не наблюдается существенных изменений  $U_{\text{пр}}$  до дозы  $D = 1 \cdot 10^6$  рад. При высоком уровне инжекции неосновных носителей заряда значение  $U_{\text{пр}}$  зависит от соотношения диффузионной длины электронов  $L_n$  и толщины  $p$ -базы  $W_p$ . Значение  $L_n$  снижается с ростом концентрации рекомбинационных центров, то есть с уменьшением времени жизни электронов в  $p$ -базе. Пока  $L_n \geq W_p$ , проводимость базы полностью модулируется электронами, что обеспечивает относительно небольшие значения  $U_{\text{пр}}$ . В противном случае должно наблюдаться увеличение  $U_{\text{пр}}$  с ростом поглощенной дозы.

**Заключение.** Проведено исследование влияния гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  на основные параметры кремниевых эпитаксиально-планарных  $p$ -канальных МОП-транзисторов в активном и пассивном электрических режимах, а также определена радиационная стойкость транзисторов (по накопленной дозе).

Установлено, что пороговое напряжение  $U_{\text{зи пор}}$  является наиболее чувствительным параметром к воздействию облучения. При  $D = 1 \cdot 10^6$  рад ( $\text{SiO}_2$ ) его значение по абсолютной величине возросло на 21 % в режиме облучения при  $U_{\text{СИ}} = 0$  В,  $U_{\text{ЗИ}} = -20$  В и на 15 % – в режимах при  $U_{\text{СИ}} = -50$  В,  $U_{\text{ЗИ}} = 0$  В и  $U_{\text{СИ}} = 0$  В,  $U_{\text{ЗИ}} = 0$  В.

Значения начального тока стока  $I_{C\text{нач}}$ , сопротивления сток-исток в открытом состоянии  $R_{\text{СИ отк}}$  и постоянного прямого напряжения диода  $U_{\text{пр}}$  с увеличением дозы облучения изменяются незначительно. Так, при  $D = 1 \cdot 10^6$  рад увеличение значения  $R_{\text{СИ отк}}$  составило порядка 5–8 %, а изменения значения  $U_{\text{пр}}$  не превысили 0,2 %. На дозовых зависимостях  $I_{C\text{нач}}$  наблюдаются незначительные немонотонные изменения.

В активном электрическом режиме облучения значения всех исследуемых параметров остались в пределах критериев работоспособности после дозы  $D = 10^6$  рад, а в пассивном –  $2,8 \cdot 10^6$  рад.

Разная степень радиационной деградации исследуемых параметров транзисторов обусловлена их зависимостью либо от эффектов ионизации в слоях подзатворных и изолирующих диэлектриков, либо от структурных нарушений в объемном кремнии активных областей приборных структур. Высокая чувствительность  $U_{\text{зи пор}}$  к облучению объясняется захватом свободных носителей заряда на глубокие центры в объеме подзатворного  $\text{SiO}_2$ , а также увеличением плотности поверхностных состояний на границе раздела  $\text{Si-SiO}_2$ . Предполагается, что изменения значений тока утечки затвора при облучении также вызваны накоплением положительного объемного фиксированного заряда, приводящего к уменьшению высоты и толщины потенциального барьера на границе диэлектрической пленки, что способствует эмиссии в нее электронов. Наблюдаемые изменения  $I_{C\text{нач}}$ ,  $U_{\text{пр}}$  связаны преимущественно с введением радиационных дефектов в области эпитаксиального слоя  $p$ -Si, а  $R_{\text{СИ отк}}$  –  $p$ -Si и  $p$ -канала.

Полученные результаты представляют интерес с точки зрения конструкторско-технологической оптимизации изделий в части радиационной стойкости. Достаточно высокая радиационная стойкость исследованных  $p$ -канальных МОП-транзисторов позволяет рекомендовать их для использования в аппаратуре авиационной и космической техники.

#### Список использованных источников

1. Белоус, А. И. Космическая электроника / А. И. Белоус, В. А. Солодуха, С. В. Шведов. – М.: Техносфера, 2015. – Кн. 2. – 732 с.
2. Радиационная стойкость изделий ЭКБ / под ред. А. И. Чумакова. – М.: Нац. исслед. ядер. ун-т «МИФИ», 2015. – 512 с.
3. Ионизирующие излучения космического пространства и их воздействие на бортовую аппаратуру космических аппаратов / под ред. Г. Г. Райкунова. – М.: Физматлит, 2013. – 256 с.
4. Першенков, В. С. Поверхностные радиационные эффекты в элементах интегральных микросхем / В. С. Першенков, В. Д. Попов, А. В. Шальнов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 256 с.
5. Коршунов, Ф. П. Воздействие радиации на интегральные микросхемы / Ф. П. Коршунов, Ю. В. Богатырев, В. А. Вавилов. – Минск: Наука и техника, 1986. – 254 с.
6. Ma, T. P. Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits / T. P. Ma, P. V. Dressendorfer. – New York: John Wiley & Sons, 1989. – 587 p. <https://doi.org/10.1148/radiology.174.3.886>
7. Чумаков, А. И. Действие космической радиации на интегральные схемы / А. И. Чумаков. – М.: Радио и связь, 2004. – 320 с.
8. Claeys, C. Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices / C. Claeys, E. Simoen. – Berlin: Springer, 2002. – 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>

9. Таперо, К. И. Радиационные эффекты в кремниевых интегральных схемах космического применения / К. И. Таперо, В. Н. Улимов, А. М. Членов. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 304 с.  
 10. Baliga, B. J. *Silicon RF Power MOSFETS* / B. J. Baliga. – N. Y.: World Scientific. 2005. – 302 p.

### References

1. Belous A. I., Soloduha V. A., Shvedov S. V. *Space Electronics. Book 2*. Moscow, Technosfera Publ., 2015. 732 p. (in Russian).
2. Chumakov A. I. (ed.) *Radiation Hardness of Electronics Products*. Moscow, National Research Nuclear University MEPhI, 2015. 512 p. (in Russian).
3. Raikunov G. G. (ed.) *Ionizing Radiation of Outer Space and their Impact on the Onboard Equipment of Spacecraft*. Moscow, Fizmatlit Publ., 2013. 256 p. (in Russian).
4. Pershenkov V. S., Popov V. D., Shal'nov A. V. *Surface Radiation Effects in Elements of Integrated Circuits*. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988. 256 p. (in Russian).
5. Korshunov F. P., Bogatyrev Yu. V., Vavilov V. A. *Effects of Radiation on Integrated Circuits*. Minsk, Nauka i tehnika Publ., 1986. 254 p. (in Russian).
6. Ma T. P., Dressendorfer P. V. *Ionizing Radiation Effects in MOS Devices and Circuits*. New York, John Wiley & Sons, 1989. 587 p. <https://doi.org/10.1148/radiology.174.3.886>
7. Chumakov A. I. *Effects of Cosmic Radiation on Integrated Circuits*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2004. 320 p. (in Russian).
8. Claeys C., Simoen E. *Radiation Effects in Advanced Semiconductor Materials and Devices*. Berlin, Springer, 2002. 402 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04974-7>
9. Tapero K. I., Ulimov V. N., Chlenov A. M. *Radiation Effects in Silicon Integrated Circuits for Space Applications*. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2012. 304 p. (in Russian).
10. Baliga B. J. *Silicon RF Power MOSFETS*. New York, World Scientific, 2005. 302 p.

### Информация об авторах

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

*Огородников Дмитрий Александрович* – младший научный сотрудник лаборатории радиационных воздействий, Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению (ул. П. Бровка, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ogorodnikov@ifftp.bas-net.by

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

*Кетько Александр Владимирович* – директор филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь).

*Кречко Михаил Михайлович* – начальник бюро филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь).

*Шпаковский Сергей Васильевич* – начальник отделения филиала НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (ул. Казинца, 121а, 220108, Минск, Республика Беларусь).

*Рубанов Павел Владимирович* – кандидат технических наук, начальник сектора, АО «Российские космические системы» (ул. Авиамоторная, 53, 111250, Москва, Российская Федерация).

*Протопопов Григорий Александрович* – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» (ул. Авиамоторная, 53, 111250, Москва, Российская Федерация).

*Чубунов Павел Александрович* – начальник НПК НТЦ-1, филиал АО «Объединенная ракетно-космическая корпорация» – «НИИ космического приборостроения» (ул. Авиамоторная, 53, 111250, Москва, Российская Федерация).

### Information about the authors

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

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

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

*Aleksandr V. Ket'ko* – Director of the Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus).

*Mikhail M. Krechko* – Head of the Bureau of the Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus).

*Sergey V. Shpakovsky* – Head of the Department of the Branch of STC “Belmikrosystems” OJSC “INTEGRAL” – Managing Company of the Holding “INTEGRAL” (121a, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus).

*Pavel V. Rubanov* – Ph. D. (Engineering), Head of the Sector, JSC “Russian Space Systems” (53, Aviamotornaya Str., 111250, Moscow, Russian Federation).

*Grigory A. Protopopov* – Ph. D. (Engineering), Leading Researcher, Branch of JSC “United Rocket and Space Corporation” – “Research Institute of Space Instrumentation” (53, Aviamotornaya Str., 111250, Moscow, Russian Federation).

*Pavel A. Chubunov* – Head of SPC STC-1, Branch of JSC “United Rocket and Space Corporation” – “Research Institute of Space Instrumentation” (53, Aviamotornaya Str., 111250, Moscow, Russian Federation).

**В. В. Легкоступ***ОАО «АЛЕВКУРП», Королев Стан, Минский район, Минская область, Республика Беларусь***СПОСОБ УСТРАНЕНИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СВЯЗИ  
КАНАЛОВ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТА, НАВОДИМОГО С ПОМОЩЬЮ  
ДВУХ РАЗНОСТНО-ДАЛЬНОМЕРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

**Аннотация.** Рассмотрена пространственная задача наведения управляемого объекта в заданную точку на основе двух разностно-дальномерных измерений с использованием трех навигационных позиций. Определено общее уравнение, которое описывает кинематическую траекторию движения объекта вдоль линии пересечения двух гиперболоидов положения, соответствующих двум разностно-дальномерным измерениям. Установлено, что кинематическая траектория движения объекта лежит в плоскости, перпендикулярной плоскости расположения навигационных позиций. Данная кинематическая траектория движения описывается уравнением коники в общем случае, а в диапазоне используемых на практике параметров положения навигационных позиций и объекта данное уравнение описывает конкретно гиперболу. Также приведен способ устранения пространственной связи каналов управления объекта, который заключается в специальном проектировании ускорений объекта при их преобразовании из измерительной системы координат в исполнительную. Это позволяет реализовать управление объектом в разностно-дальномерной навигационной системе при наличии трех навигационных позиций с использованием двух идентичных выражений кинематической связи, полученных для плоскостного случая, не требуя вывода полного, пространственного уравнения кинематической связи параметров движения объекта и разностно-дальномерной информации. Выполнено компьютерное моделирование процесса наведения объекта в точку цели в пространстве с использованием двух разностно-дальномерных измерений для проверки адекватности выражений проектирования ускорений, которое подтвердило работоспособность данного способа. Приведенный подход позволяет реализовать наведение объекта в разностно-дальномерной навигационной системе при наличии сигналов только от трех навигационных позиций из четырех требуемых.

**Ключевые слова:** разностно-дальномерная навигация, пространственная связь каналов управления, гиперболоид положения, гипербола положения, беспилотный летательный аппарат, наведение

**Для цитирования:** Легкоступ, В. В. Способ устранения пространственной связи каналов управления объекта, наводимого с помощью двух разностно-дальномерных измерений / В. В. Легкоступ // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 409–420. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-409-420>

**Victor V. Legkostup***JSC "ALEVKURP", Korolev Stan, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus***METHOD OF SPATIAL CROSS-COUPPLING ELIMINATION OF CONTROL SYSTEM CHANNELS  
FOR OBJECT GUIDANCE USING TWO TDoA MEASUREMENTS**

**Abstract.** The problem of object guidance to the target point using two time difference of arrival (TDoA) measurements obtained from three navigation positions is considered. A general equation that describes a kinematic trajectory of the object along the line of intersection of two object position hyperboloids corresponding to the two TDoA measurements is obtained. It has been found out that the kinematic trajectory of the object lies in a plane perpendicular to the plane of three navigation positions. This kinematic trajectory can be described by the conic equation in the general case, and in the range of position parameters used in practice this equation yields a hyperbola. A method of elimination of object spatial cross-coupled link between control system channels, consisting in a special projection of accelerations of the object during their transformation from the measuring coordinate system to the wind coordinate system is described. This made it possible to implement object control in TDoA navigation system with three navigation positions only using two identical expressions of the kinematic link obtained for a planar case without full spatial equation for kinematic link of the object's motion and TDoA information. A computer simulation of the object guidance to a target point in space using two TDoA measurements was performed to check the accordance of the acceleration design expressions, which produced a positive results of viewed method. The approach described in the article makes it possible to implement object guidance using TDoA navigation system if available only three of four required navigation positions.

**Keywords:** TDoA, navigation, kinematic link, guidance, unmanned aerial vehicle, hyperbola, hyperboloid

**For citation:** Legkostup V. V. Method of spatial cross-coupling elimination of control system channels for object guidance using two TDoA measurements. *Vesti Natsyyanal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-technichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 409–420 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-409-420>

**Введение.** Исследованию разностно-дальномерных навигационных систем посвящено достаточно много работ, краткое рассмотрение которых можно найти в [1, 2]. Основной тенденцией развития данного направления стало создание сначала наземных разностно-дальномерных навигационных систем, а затем и спутниковых [3]. Одним из преимуществ этого вида систем является возможность одновременного обслуживания множества объектов – потребителей навигационной информации (далее – объектов), поскольку объектам не требуется передавать какой-либо запросный сигнал. Другое преимущество – потенциальное удешевление и уменьшение массогабаритных характеристик навигационного оборудования объектов.

В классической постановке решение навигационной задачи в пространстве требует наличия по крайней мере трех разностно-дальномерных измерений, получаемых на основе приема сигналов от четырех навигационных позиций [3]. В случае потери навигационных сигналов от одной или нескольких навигационных позиций получить решение навигационной задачи, которое однозначно соответствовало бы местоположению объекта, становится невозможным. Некоторые вопросы, связанные с помехоустойчивостью и надежностью работы современных спутниковых систем навигации, рассмотрены в [4, 5]. В определенных случаях возможно создание такой конфигурации навигационной системы и объектов, что при наличии лишь трех навигационных позиций получаемое множество решений пересекается с целевой точкой, в которую объект совершает движение. Организации решения такой задачи посвящена данная работа.

Для решения задачи наведения объекта с помощью разностно-дальномерной навигационной системы автором в [6] была разработана аналитическая методика получения кинематической связи разностно-дальномерных измерений и параметров движения объекта для двумерного случая. Это позволило синтезировать контур управления, осуществляющий наведение объекта на плоскости вдоль гиперболы, используя при этом две навигационные позиции вместо трех [7]. Попытка обобщить данный подход на случай трехмерного пространства для решения задачи наведения объекта с применением уменьшенного количества разностно-дальномерных измерений, используя при этом три позиции разностно-дальномерной навигационной системы вместо четырех, приводит к необходимости поиска пространственной связи разностно-дальномерной информации и параметров движения объекта.

Основная проблема реализации пространственного наведения с использованием кинематической связи для плоскостного случая заключается в том, что в пространстве объект не движется строго в плоскости действия ускорений, вырабатываемых под воздействием устройства управления. Эта плоскость меняет свою ориентацию вместе с движением объекта. При переходе от двумерного движения к трехмерному, во-первых, линии положения объекта в виде гипербол превращаются в поверхности положения, являющиеся двуполостными гиперболоидами вращения. Поскольку объект перемещается в пространстве, то плоскость, в которой происходит его движение, в общем случае не проходит через линии баз навигационных позиций, что предполагалось при получении выражения кинематической связи в [6]. Во-вторых, возникает пространственная взаимосвязь каналов управления. Это обусловлено тем, что объект может быть ориентирован в пространстве произвольным образом по отношению к поверхностям положения, связанным с навигационными позициями, которые определяют измерительную систему координат объекта.

Решить данную проблему можно несколькими способами. Первый способ заключается в вычислении нормалей к гиперболоидам положения в точке объекта и построении локального касательного базиса, на который определенным образом необходимо спроектировать управляющие ускорения объекта, компенсирующие связи каналов управления. Второй способ заключается в определении кинематической связи управляющих ускорений объекта и измеряемых им разностей дальностей, а также их производных для пространственного случая с учетом взаимной связи каналов управления. Поскольку кинематическая связь для плоскостного случая уже была определена ранее в [6], в данной работе рассматривается связь ускорений объекта между измерительной и исполнительной (в которой действуют ускорения объекта) системами координат, что позволяет реализовать устройство перепроектирования ускорений для устранения пространственной связи каналов управления и использование для наведения объекта в пространстве комбинации из двух контуров управления, полученных для плоскостного случая в [7].

**Кинематическая траектория пространственного движения объекта.** Рассмотрим движение объекта  $B$  вдоль линии пересечения двух гиперболоидов положения  $\Gamma_1, \Gamma_2$ , определяемых по-

стоянными значениями разностей дальностей от объекта до двух пар навигационных позиций (НП), одна из которых общая:  $\Pi_0, \Pi_1$  и  $\Pi_0, \Pi_2$  соответственно. Для простоты пусть начало декартовой системы координат совмещено с общей навигационной позицией  $\Pi_0$ , которая выступает в роли ведущей. Будем считать, что вторая НП  $\Pi_1$  располагается вдоль оси  $OX$  навигационной системы координат (НСК). Третья НП  $\Pi_2$  располагается в плоскости  $OXZ$  НСК таким образом, что линия, образованная НП  $\Pi_0$  и  $\Pi_2$  расположена под углом  $\phi_b$  к линии, проходящей через НП  $\Pi_0$  и  $\Pi_1$ . Первая база системы, образованная позициями  $\Pi_0$  и  $\Pi_1$ , имеет длину  $b_1 = 2c_1$ , где  $c_1$  – фокусное расстояние для первой пары позиций. Вторая база системы, образованная позициями  $\Pi_0$  и  $\Pi_2$ , соответственно имеет длину  $b_2 = 2c_2$ , где  $c_2$  – фокусное расстояние для второй пары позиций.

Расстояние между объектом и точками  $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2$  обозначим следующим образом:

$$\begin{aligned} d_0 &= \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}, \\ d_1 &= \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}, \\ d_2 &= \sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}, \end{aligned} \tag{1}$$

где  $x, y, z$  – декартовы координаты объекта;  $x_0, y_0, z_0$  – декартовы координаты навигационной позиции  $\Pi_0$ ;  $x_1, y_1, z_1$  – декартовы координаты навигационной позиции  $\Pi_1$ ;  $x_2, y_2, z_2$  – декартовы координаты навигационной позиции  $\Pi_2$ .

На рис. 1 отражено взаимное расположение трех НП  $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2$ , объекта  $B$ , а также кинематической траектории движения объекта (пунктирная линия).

Если ввести разности времен распространения навигационного сигнала от двух пар НП до объекта в виде

$$\Delta t_{01} = \frac{\Delta d_{01}}{c}; \quad \Delta t_{02} = \frac{\Delta d_{02}}{c}, \tag{2}$$

где  $\Delta d_{01} = d_0 - d_1$ ;  $\Delta d_{02} = d_0 - d_2$ ;  $c$  – скорость распространения навигационного сигнала в среде, то гиперboloид положения  $\Gamma_1$  будет определяться условием  $\Delta t_{01} = \text{const}$ , а гиперboloид положения  $\Gamma_2$  – условием  $\Delta t_{02} = \text{const}$ . На рис. 2 приведены построенные в среде Wolfram Mathematica изображения с двух ракурсов трех навигационных позиций, двух гиперboloидов положения объекта и линии пересечения гиперboloидов положения соответствующей кинематической траектории движения объекта.

Величины  $\Delta t_{01}$  и  $\Delta t_{02}$  доступны для непосредственного измерения объектом, однако для удобства дальнейшего анализа будем характеризовать гиперboloиды положения  $\Gamma_1, \Gamma_2$  объекта следующими безразмерными параметрами, используемыми в эллиптической системе координат [8]:

$$\tau_1 = \frac{c\Delta t_{01}}{b_1}; \quad \tau_2 = \frac{c\Delta t_{02}}{b_2}. \tag{3}$$

Точки  $\Pi_0, \Pi_1, \Pi_2$  образуют плоскость, описываемую следующим уравнением:

$$A_1x + A_2y + A_3z + A_4 = 0, \tag{4}$$

где  $A_1 = \begin{vmatrix} y_0 & z_0 & 1 \\ y_1 & z_1 & 1 \\ y_2 & z_2 & 1 \end{vmatrix}; A_2 = \begin{vmatrix} z_0 & x_0 & 1 \\ z_1 & x_1 & 1 \\ z_2 & x_2 & 1 \end{vmatrix}; A_3 = \begin{vmatrix} x_0 & y_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \end{vmatrix}; A_4 = - \begin{vmatrix} x_0 & y_0 & z_0 \\ x_1 & y_1 & z_1 \\ x_2 & y_2 & z_2 \end{vmatrix}.$

Определим вид кинематической траектории движения объекта. Данная траектория является линией пересечения гиперboloидов положения объекта. Она находится из условия  $\tau_1 = \tau_2$ . Приравнявая выражения (3) друг другу и используя выражения (2), получим следующее уравнение, определяющее линию пересечения гиперboloидов  $\Gamma_1, \Gamma_2$ :

$$d_0 - d_1 - b_1\tau_1 = d_0 - d_2 - b_2\tau_2. \tag{5}$$

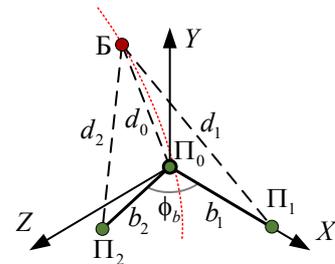


Рис. 1. Взаимное пространственное расположение позиций навигационной системы и наводимого объекта  
Fig. 1. Relative spatial location of the positions of the navigation system and the guided object

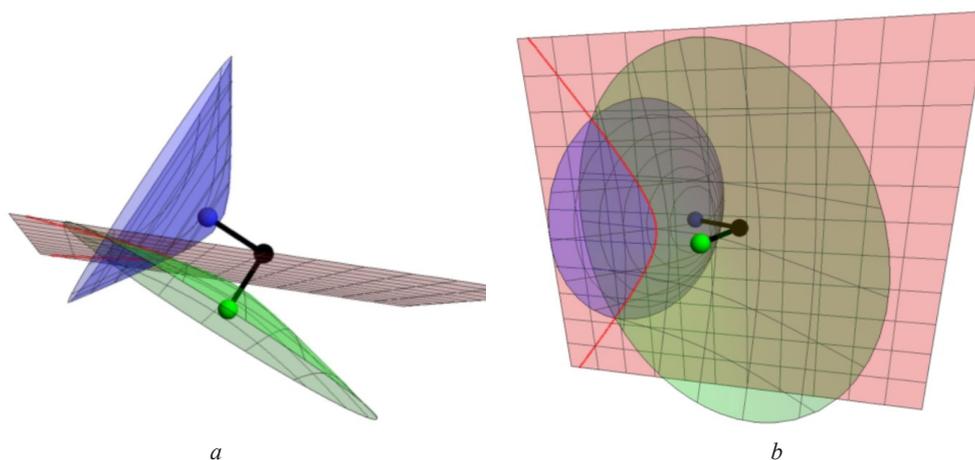


Рис. 2. Внешний вид гиперboloидов положения объекта (зеленый и синий цвета), плоскости наведения (розовый цвет) и кинематической траектории наведения объекта (красный цвет): *a* – вид сверху, *b* – вид сбоку. Навигационные позиции изображены в виде шаров черного, синего и зеленого цветов

Fig. 2. Appearance of the hyperboloids of the object position (green and blue), the plane of guidance (pink) and the kinematic trajectory of the guided object (red): *a* – top view, *b* – side view. Navigation positions are depicted as balls in black, blue and green colors

Возводя в квадрат обе части уравнения (5) и вводя обозначения  $\tilde{x}_1 = x_1 - x_0$ ,  $\tilde{x}_2 = x_2 - x_0$ ,  $\tilde{y}_1 = y_1 - y_0$ ,  $\tilde{y}_2 = y_2 - y_0$ ,  $\tilde{z}_1 = z_1 - z_0$ ,  $\tilde{z}_2 = z_2 - z_0$ ,  $d_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$ ,  $d_1 = \sqrt{x_1^2 + y_1^2 + z_1^2}$ ,  $d_2 = \sqrt{x_2^2 + y_2^2 + z_2^2}$ , получим уравнение плоскости, в которой расположена кинематическая траектория движения объекта:

$$2x(\Delta d_{02}\tilde{x}_1 - \Delta d_{01}\tilde{x}_2) + 2y(\Delta d_{02}\tilde{y}_1 - \Delta d_{01}\tilde{y}_2) + 2z(\Delta d_{02}\tilde{z}_1 - \Delta d_{01}\tilde{z}_2) + \Delta d_{02}(d_0^2 - d_1^2 + \Delta d_{01}^2) - \Delta d_{01}(d_0^2 - d_2^2 + \Delta d_{02}^2) = 0. \quad (6)$$

Уравнение данной плоскости может быть записано в общем виде:

$$B_1x + B_2y + B_3z + B_4 = 0, \quad (7)$$

где  $B_1 = 2(\Delta d_{02}x_1 - \Delta d_{01}x_2)$ ;  $B_2 = 2(\Delta d_{02}y_1 - \Delta d_{01}y_2)$ ;  $B_3 = 2(\Delta d_{02}z_1 - \Delta d_{01}z_2)$ ;  $B_4 = \Delta d_{02}(\Delta d_{01}^2 + d_0^2 - d_1^2) - \Delta d_{01}(\Delta d_{02}^2 + d_0^2 - d_2^2)$ .

Из выражения (6) видно, что линия пересечения двух гиперboloидов лежит в плоскости, которая полностью определяется координатами навигационных позиций и разностями расстояний  $\Delta d_{01}$ ,  $\Delta d_{02}$  до объекта. Данная плоскость является ортогональной к плоскости расположения баз навигационной системы, поскольку скалярное произведение нормальных векторов к данным плоскостям равно нулю:

$$A_1B_1 + A_2B_2 + A_3B_3 = 0. \quad (8)$$

Для определения вида линии пересечения гиперboloидов необходимо найти проекцию множества точек, общих для гиперboloидов  $\Gamma_1$ ,  $\Gamma_2$ , на какую-либо из координатных плоскостей. Это можно сделать путем исключения одной из переменных в уравнении гиперboloида  $\Gamma_1$ , производя подстановку данной переменной из уравнения гиперboloида  $\Gamma_2$ . Например, исключая переменную  $z$ , получим выражение

$$C_{11}x^2 + 2C_{12}xy + C_{22}y^2 + 2C_{13}x + 2C_{23}y + C_{33} = 0, \quad (9)$$

где  $C_{11}$ ,  $C_{12}$ ,  $C_{13}$ ,  $C_{22}$ ,  $C_{23}$ ,  $C_{33}$  – коэффициенты, зависящие от расположения НП и объекта (не приведены в явном виде ввиду своей громоздкости).

Выражение (9) описывает различные коники в общем случае. Однако при задании координат НП и объекта в практически важном диапазоне значений, а именно когда угол  $\phi_b$  близок к прямому (отличается от прямого не более чем на  $30^\circ$ ) и параметры  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  гиперboloидов положения объекта находятся в диапазоне  $[-0,7; 0,7]$ , выражение (9) описывает гиперболу. Задание данного диапазона значений является вполне приемлемым условием, поскольку в случае слишком острого угла  $\phi_b$  гиперboloиды положения будут также пересекаться под острым углом, существенно ухудшая точность оценки пространственного местоположения объекта. В случае близких

к  $\pm 1$  значений параметров  $\tau_1, \tau_2$  кривизна кинематической траектории движения объекта окажется достаточно высокой, что приведет к значительной динамической ошибке.

**Связь ускорений объекта в измерительной и исполнительной системах координат.** Для устранения перекрестной связи каналов управления необходимо осуществить проектирование требуемых нормальных ускорений объекта, вычисленных для измерительной системы координат на оси, вдоль которых действуют физические ускорения объекта, представляемые обычно в скоростной системе координат. Приведенные в [6] аналитические выражения определяют зависимость соответствующего разностно-дальномерного навигационного параметра  $\tau$  от кинематического ускорения  $W$ , действующего по нормали к гиперболе положения объекта. Для двух измерительных каналов кинематическая связь будет представлена в виде уравнений:

$$W_1 = c_1(2\dot{\rho}_1\dot{\tau}_1 + \rho_1\ddot{\tau}_1); \quad W_2 = c_2(2\dot{\rho}_2\dot{\tau}_2 + \rho_2\ddot{\tau}_2), \quad (10)$$

где  $W_1, W_2$  – кинематические ускорения объекта, связанные с измерительной системой координат;  $\rho_1 = \frac{d_0 + d_1}{b_1}, \rho_2 = \frac{d_0 + d_2}{b_2}$  – нормированные суммарные дальности между объектом и парами позиций  $\Pi_0, \Pi_1$  и  $\Pi_0, \Pi_2$  соответственно.

Переход к пространственному случаю в уравнениях (10) осуществляется путем вращения гипербол положения, получаемых из уравнения вокруг оси, проходящей через навигационные позиции. В таком случае нормали к гиперболам положения, вдоль которых действуют ускорения  $W_1, W_2$ , переходят в нормали  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$  к соответствующим гиперблоидам положения  $\Gamma_1, \Gamma_2$ . При переходе к пространственному случаю необходимо определить эти нормали для выражения связи физических ускорений объекта  $W_y, W_z$  с ускорениями  $W_1, W_2$  измерительной системы координат. Нормали  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$  определяются через градиенты соответствующих параметров  $\tau_1, \tau_2$  как функций, зависящих от координат:

$$\mathbf{n}_1 = \nabla\tau_1 = \begin{pmatrix} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}} \\ \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \frac{y - y_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}} \\ \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \frac{z - z_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2}} \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$\mathbf{n}_2 = \nabla\tau_2 = \begin{pmatrix} \frac{x}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \frac{x - x_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}} \\ \frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \frac{y - y_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}} \\ \frac{z}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} - \frac{z - z_2}{\sqrt{(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2}} \end{pmatrix}.$$

Используя данные нормали, легко определить касательный к линии пересечения гиперблоидов вектор  $\mathbf{n}_0$ , являющийся бинормалью полученных в (11) градиентов:

$$\mathbf{n}_0 = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_2. \quad (12)$$

Данные векторы  $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$  формируют базис локальной измерительной системы координат, не являющийся ортогональным в общем случае. При проектировании ускорений объекта на базис измерительной системы координат с целью устранения связи каналов основным требованием должно стать отсутствие какого-либо влияния ускорения  $W_1$  первого измерительного канала, вызванного наличием рассогласования по параметру  $\tau_1$  на второй измерительный канал, соответствующий гиперблоиду положения  $\Gamma_2$ . В противном случае это вызвало бы появление рассогла-

сования и по параметру  $\tau_2$ , приводя к возникновению ускорения  $W_2$ , влияющего в свою очередь на измерение параметра  $\tau_1$ , что характеризовало бы наличие перекрестной положительной обратной связи каналов управления. Это же утверждение справедливо в отношении влияния ускорения  $W_2$  второго измерительного канала на рассогласование по параметру  $\tau_1$ . Математически отсутствие перекрестных обратных связей может быть выражено в виде равенств:

$$\mathbf{W}_1 \cdot \mathbf{n}_2 = 0; \quad \mathbf{W}_2 \cdot \mathbf{n}_1 = 0, \quad (13)$$

где  $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$  – векторы, вдоль которых должны действовать ускорения  $W_1, W_2$  соответственно при отсутствии перекрестных обратных связей.

Условия (13) определяют лишь плоскости, в которых располагаются соответствующие векторы  $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$ . Дополнительным условием, которое позволяет однозначно определить данные векторы, может быть ортогональность искомым векторам вектору, касательному к линии пересечения гиперboloидов  $\Gamma_1, \Gamma_2$ :

$$\mathbf{W}_1 \cdot \mathbf{n}_0 = 0; \quad \mathbf{W}_2 \cdot \mathbf{n}_0 = 0. \quad (14)$$

Условие (14) является вполне естественным, так как при синтезе систем управления подвижными объектами, в особенности летательными аппаратами, обычно рассматривается действие управляющих ускорений в плоскости, нормаль к которой близка по направлению к касательному вектору траектории движения объекта.

Поскольку из условий (13), (14) видно, что вектор  $\mathbf{W}_1$  ортогонален векторам  $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_2$ , а вектор  $\mathbf{W}_2$  ортогонален векторам  $\mathbf{n}_0, \mathbf{n}_1$ , можно заключить, что векторы  $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$  действуют вдоль соответствующих векторов  $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$ :

$$\mathbf{m}_1 = \mathbf{n}_1 \times \mathbf{n}_0; \quad \mathbf{m}_2 = \mathbf{n}_2 \times \mathbf{n}_0. \quad (15)$$

На рис. 3 показано взаимное расположение базиса исполнительной системы координат, вдоль ортов которой действуют ускорения  $W_1, W_2$  объекта, а также нормалей к гиперболам положения объекта, образованных сечением гиперboloидов положения плоскостью, ортогональной к касательному вектору траектории движения объекта.

Таким образом, векторы  $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$  с целью устранения связи каналов управления должны определяться в виде соответствующих проекций:

$$\mathbf{W}_1 = W_1 \frac{\mathbf{m}_2}{\|\mathbf{m}_2\|}; \quad \mathbf{W}_2 = W_2 \frac{\mathbf{m}_1}{\|\mathbf{m}_1\|}. \quad (16)$$

Если гиперboloиды положения в точке расположения объекта пересекаются ортогонально друг другу, то в результате проектирования ускорений  $W_1, W_2$  будут получены равенства:

$$\mathbf{m}_1 = \mathbf{n}_2; \quad \mathbf{m}_2 = \mathbf{n}_1, \quad (17)$$

означающие то, что ускорения объекта действуют строго вдоль нормалей к гиперboloидам  $\Gamma_1, \Gamma_2$ . Если же эти гиперboloиды пересекаются неортогонально друг другу, то проектирование (16)

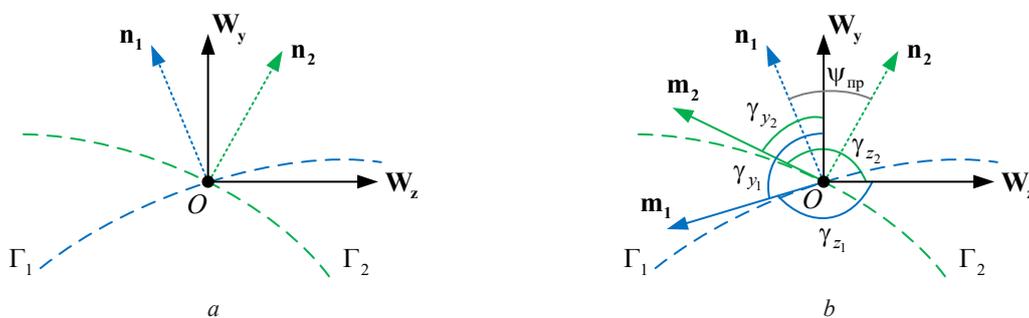


Рис. 3. Взаимное расположение базиса системы координат, в которой действуют ускорения объекта  $W_y, W_z$  и нормальных векторов  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$  к гиперboloидам положения в их сечении (a), а также касательных векторов  $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$  к гиперboloидам положения объекта (b)

Fig. 3. Relative location of the object coordinate system related to the object accelerations  $W_y, W_z$  and normal vectors  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$  to the object position hyperboloids in its cross section (a), tangent vectors  $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2$  to the object position hyperboloids (b)

привнесет в выражения кинематических связей (10) дополнительный коэффициент усиления  $k_m$ , лежащий в диапазоне от нуля до единицы, который снижает общие коэффициенты передач кинематических связей:

$$\begin{aligned} W_1 &= k_m c_1 (2\dot{\rho}_1 \dot{\tau}_1 + \rho_1 \ddot{\tau}_1); \\ W_2 &= k_m c_2 (2\dot{\rho}_2 \dot{\tau}_2 + \rho_2 \ddot{\tau}_2), \end{aligned} \tag{18}$$

где  $k_m = 1 - \mathbf{n}_1 \cdot \mathbf{n}_2$ .

Теперь следует спроектировать управляющие ускорения объекта  $W_y, W_z$  на векторы  $\mathbf{W}_1, \mathbf{W}_2$ . Для этого необходимо знать ориентацию скоростной системы координат объекта в пространстве. Установим эту ориентацию с помощью углов курса  $\varphi$ , наклона вектора скорости  $\theta$  и крена  $\gamma$ , определяющих повороты вокруг осей  $OY, OZ, OX$  земной правосторонней системы координат соответственно. Таким образом, матрица поворота объекта задается выражением

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix}. \tag{19}$$

После проектирования ускорения объекта примут следующий вид:

$$\begin{aligned} W_{m_1} &= \frac{W_2}{\mathbf{m}_1 \mathbf{n}_2} = -W_2 \operatorname{csc} \psi_{\text{пр}}; \\ W_{m_2} &= \frac{W_1}{\mathbf{m}_2 \mathbf{n}_1} = W_1 \operatorname{csc} \psi_{\text{пр}}, \end{aligned} \tag{20}$$

где  $\psi_{\text{пр}}$  – угол между нормальными  $\mathbf{n}_1, \mathbf{n}_2$ .

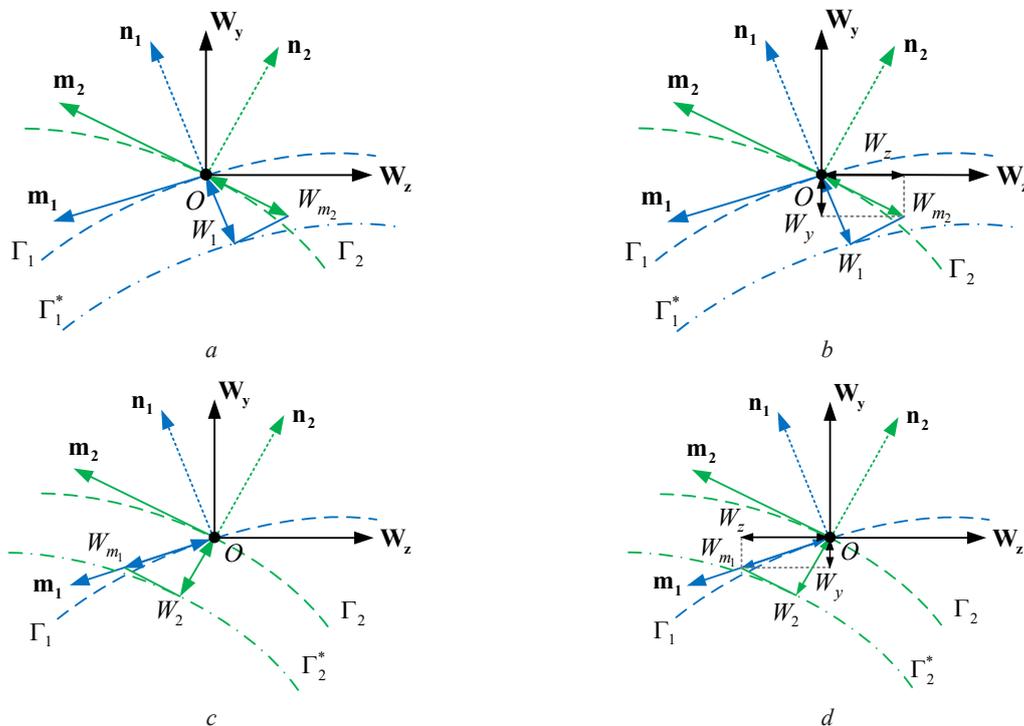


Рис. 4. Взаимное расположение системы координат объекта, в котором действуют нормальные ускорения  $W_y, W_z$ , и проекций измерительной системы координат:  $a$  – проекция ускорения  $W_1$ , действующего вдоль вектора  $\mathbf{n}_1$  на вектор  $\mathbf{m}_2$ ;  $b$  – проекции вектора  $\mathbf{W}_{m_2}$  на оси, вдоль которых действуют ускорения объекта  $W_y, W_z$ ;  $c, d$  – аналогичные графикам  $a, b$  проекции ускорения  $W_2$  на оси  $W_y, W_z$

Fig. 4. Relative location of the object coordinate system, normal accelerations  $W_y, W_z$  and projections of the measuring coordinate system:  $a$  – projection of acceleration  $W_1$  acting along vector  $\mathbf{n}_1$  onto vector  $\mathbf{m}_2$ ;  $b$  – projections of vector  $\mathbf{W}_{m_2}$  on the axes connected to accelerations  $W_y, W_z$ ;  $c, d$  – similar to  $a, b$  projections of acceleration  $W_2$  onto  $W_y, W_z$

Полученные в (20) проекции ускорений объекта представляют собой вектор

$$\mathbf{W}_m = W_{m_1} \frac{\mathbf{m}_2}{\|\mathbf{m}_2\|} + W_{m_2} \frac{\mathbf{m}_1}{\|\mathbf{m}_1\|}. \quad (21)$$

На рис. 4 приведена геометрия взаимного расположения скоростной системы координат в плоскости управления, в которой действуют ускорения  $W_y$ ,  $W_z$ , а также проекции ускорений  $W_{m_1}$ ,  $W_{m_2}$  измерительной системы координат.

Таким образом, окончательный вид связи ускорений объекта и проекций ускорений измерительной системы координат устанавливается следующими уравнениями:

$$W_y = \mathbf{W}_m \frac{\mathbf{W}_y}{\|\mathbf{W}_y\|} = W_{m_1} \cos \gamma_{y_1} + W_{m_2} \cos \gamma_{y_2}; \quad W_z = \mathbf{W}_m \frac{\mathbf{W}_z}{\|\mathbf{W}_z\|} = W_{m_1} \cos \gamma_{z_1} + W_{m_2} \cos \gamma_{z_2}, \quad (22)$$

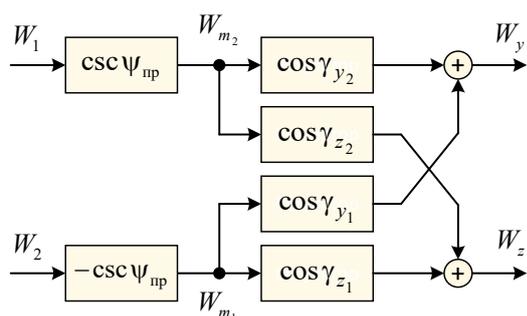


Рис. 5. Функциональная схема устройства проектирования ускорений объекта из измерительной системы координат в скоростную

Fig. 5. Functional diagram of the system transformation of object accelerations from the measuring coordinate system to the velocity coordinate system

где  $\gamma_{y_1}$ ,  $\gamma_{y_2}$  – углы между осью  $OY$  скоростной системы координат объекта и векторами  $\mathbf{m}_1$ ,  $\mathbf{m}_2$  соответственно;  $\gamma_{z_1}$ ,  $\gamma_{z_2}$  – углы между осью  $OZ$  скоростной системы координат объекта и векторами соответственно.

Из выражений (22) видно, что в общем случае при отклонении от ортогональности поверхностей положения между собой, то есть по мере того, как угол между нормальными к гиперболоидам положения становится все более отличным от прямого, эффективность управления снижается.

На рис. 5 приведена функциональная схема устройства проектирования требуемых ускорений объекта, которые вырабатываются в измерительной системе координат, в управляющие ускорения, действующие в скоростной системе координат.

**Проверка предлагаемого способа проектирования ускорений методом компьютерного моделирования.** Работоспособность представленной кинематической связи ускорений проверялась методом компьютерного моделирования. Для этого использовалась пространственная модель движения летательного аппарата, описываемая следующими выражениями [9]:

$$\begin{aligned} \omega_z &= W_y / V; \quad \omega_y = -W_z / V; \quad \alpha = W_y T_{\text{сн}} / V; \quad \beta = -W_z T_{\text{сн}} / V; \\ \omega_{x_1} &= \omega_x \cos(\alpha) \cos(\beta) + (\omega_y + \dot{\beta}) \sin(\alpha) - \omega_z \cos(\alpha) \sin(\beta); \\ \omega_{y_1} &= -\omega_x \sin(\alpha) \cos(\beta) + (\omega_y + \dot{\beta}) \cos(\alpha) + \omega_z \sin(\alpha) \sin(\beta); \\ \omega_{z_1} &= \omega_x \sin(\beta) + \omega_z \cos(\beta) + \dot{\alpha}; \\ \omega_x &= (\omega_{y_1} \sin(\alpha) + \omega_{x_1} \cos(\alpha)) / \cos(\beta) - \omega_z \tan(\beta) + \lambda_x; \\ \dot{v} &= (\omega_x - \tan(\theta) (\omega_y \cos(v) - \omega_z \sin(v))); \\ \dot{\varphi} &= (\omega_y \cos(v) - \omega_z \sin(v)) / \cos(\theta); \quad \dot{\theta} = \omega_y \sin(v) + \omega_z \cos(v); \\ \dot{x} &= V \cos(\theta) \cos(\varphi); \quad \dot{y} = V \sin(\theta); \quad \dot{z} = -V \cos(\theta) \sin(\varphi), \end{aligned} \quad (23)$$

где  $\omega_y$ ,  $\omega_z$ ,  $\omega_x$  – угловые скорости вращения скоростной системы координат, связанной с вектором скорости объекта по углу курса, углу наклона вектора скорости и углу крена соответственно;  $V$  – модуль вектора скорости объекта;  $T_{\text{сн}}$  – постоянная снаряда для объекта, равная отношению скорости объекта к коэффициенту передачи от угла атаки к нормальному ускорению объекта ( $T_{\text{сн}} = 1$ );  $\alpha$ ,  $\beta$  – углы атаки и скольжения соответственно;  $\omega_{y_1}$ ,  $\omega_{z_1}$ ,  $\omega_{x_1}$  – угловые скорости вращения системы координат, связанной с корпусом объекта, соответствующие изменениям углов рыскания, тангажа и крена;  $\lambda_x$  – сигнал управления по крену;  $v$ ,  $\varphi$ ,  $\theta$  – углы крена, курса и наклона вектора скорости соответственно;  $x$ ,  $y$ ,  $z$  – декартовы координаты объекта.

Используемые в задачах наведения объекты, как правило, стабилизированы по крену, что может быть реализовано следующим выражением, соответствующим классическому пропорционально-дифференцирующему регулятору [9]:

$$\lambda_x = k_{xp}(v_0 - v) + k_{xd}(\dot{v}_0 - \dot{v}), \tag{24}$$

где  $k_{xp}, k_{xd}$  – коэффициенты усиления регулятора по рассогласованию и по производной от рассогласования соответственно, которые выбираются из условий устойчивости контура управления и его качества работы ( $k_{xp} = 70, k_{xd} = 0,1$ );  $v_0, \dot{v}_0$  – требуемое значение по углу крена и его производной (полагаются равными нулю).

Непосредственно сам регулятор, формирующий требуемые ускорения объекта, был реализован на основании следующих уравнений [2]:

$$W_1 = c_1 \rho_1 \left[ k_s^2 (\tau_{10} - \tau_1) + \sqrt{2} k_s (\dot{\tau}_{10} - \dot{\tau}_1) \right]; \quad W_2 = c_2 \rho_2 \left[ k_s^2 (\tau_{20} - \tau_2) + \sqrt{2} k_s (\dot{\tau}_{20} - \dot{\tau}_2) \right], \tag{25}$$

где  $k_s^2$  – параметр, определяющий полосу пропускания и устойчивость системы ( $k_s^2 = 1$ );  $\tau_{10}, \tau_{20}$  – разностно-дальномерные параметры положения точки цели;  $\dot{\tau}_{10}, \dot{\tau}_{20}$  – скорости изменения разностно-дальномерных параметров положения точки цели (полагаются равными нулю).

Так как для оценки нормалей (11) к гиперболоидам положения следует осуществлять оценку координат объекта, то в общем случае помимо измерений объектом двух разностей дальностей необходимо иметь также оценку расстояния между объектом и навигационной системой, поскольку направление градиента (11) наиболее сильно меняется вблизи базовых линий. Такая оценка дальности может вырабатываться с использованием итерационного обобщенного метода наименьших квадратов (ОМНК). Имея оценку координат объекта в земной системе координат, а также оценку координат навигационной системы, можно получить начальную оценку координат  $x^*, y^*, z^*$  объекта по отношению к навигационной системе, а также уточнить ее с использованием измеренных значений разностей дальностей до навигационных позиций с помощью ОМНК. При отсутствии какой-либо информации о дальности между объектом и навигационной системой работоспособность такой системы можно обеспечить лишь в том случае, если процесс наведения объекта начинается на расстоянии между объектом и навигационной системой, значительно превышающем наибольшую из двух базовых линий. В таком случае направления векторов градиентов (11) будут изменяться незначительно в зависимости от дальности до объекта, так как гиперболоиды положения объекта на относительно больших дальностях приближаются к своим асимптотическим конусам. Более точные оценки можно получить, используя оценку суммарных дальностей  $\hat{\rho}_1, \hat{\rho}_2$  путем измерения собственной скорости объекта  $V_0$  и доплеровских сдвигов частоты навигационных сигналов [10]. Имея вектор  $\mathbf{x}^* = [x^* \ y^* \ z^*]^T$  оценок относительных декартовых координат объекта в навигационной системе, а также вектор измерений  $\mathbf{z}_{\text{МНК}} = [\hat{\tau}_1 \ \hat{\tau}_2 \ \hat{\rho}_1 \ \hat{\rho}_2]^T$ , итерационный ОМНК реализуется на основании выражения [11]

$$\mathbf{x}_{n+1}^* = \mathbf{x}_n^* + \left( \mathbf{H}_c^T \mathbf{W}_c \mathbf{H}_c \right)^{-1} \mathbf{H}_c^T \mathbf{W}_c \left( \mathbf{z}_{\text{МНК}} - \mathbf{f}_{\text{МНК}}(\mathbf{x}_n^*) \right), \tag{26}$$

где  $n$  – номер текущей итерации;  $\mathbf{W}_c = \begin{bmatrix} \sigma_{\tau_1}^2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{\tau_2}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\rho_1}^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sigma_{\rho_2}^2 \end{bmatrix}^{-1}$  – диагональная весовая матрица,

обратная к ковариационной матрице вектора  $\mathbf{z}_{\text{МНК}}$ ;  $\mathbf{f}_{\text{МНК}}(\mathbf{x}^*) = \begin{bmatrix} \tau_1(\mathbf{x}^*) \\ \tau_2(\mathbf{x}^*) \\ \rho_1(\mathbf{x}^*) \\ \rho_2(\mathbf{x}^*) \end{bmatrix}$  – векторная функция;

$\rho_1(\mathbf{x}^*) = \frac{d_0(\mathbf{x}^*) + d_1(\mathbf{x}^*)}{2c_1}$ ,  $\rho_2(\mathbf{x}^*) = \frac{d_0(\mathbf{x}^*) + d_2(\mathbf{x}^*)}{2c_2}$  – суммарные дальности между объектом и па-

рами позиций  $\Pi_0$ ,  $\Pi_1$  и  $\Pi_0$ ,  $\Pi_2$  соответственно;  $\mathbf{H}_c = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \tau_1(\mathbf{x}^*) & \frac{\partial}{\partial y} \tau_1(\mathbf{x}^*) & \frac{\partial}{\partial z} \tau_1(\mathbf{x}^*) \\ \frac{\partial}{\partial x} \tau_2(\mathbf{x}^*) & \frac{\partial}{\partial y} \tau_2(\mathbf{x}^*) & \frac{\partial}{\partial z} \tau_2(\mathbf{x}^*) \\ \frac{\partial}{\partial x} \rho_1(\mathbf{x}^*) & \frac{\partial}{\partial x} \rho_1(\mathbf{x}^*) & \frac{\partial}{\partial x} \rho_1(\mathbf{x}^*) \\ \frac{\partial}{\partial x} \rho_2(\mathbf{x}^*) & \frac{\partial}{\partial y} \rho_2(\mathbf{x}^*) & \frac{\partial}{\partial z} \rho_2(\mathbf{x}^*) \end{bmatrix}$  – матрица

Якоби, вычисляемая для текущих декартовых координат  $\mathbf{x}^*$  объекта.

Итерационный процесс получения оценки ОМНК проводился до тех пор, пока различие вектора  $\mathbf{x}^*$  в двух последующих итерациях не оказывалось меньше 5 % от длины наименьшей из баз НС. Измеряемые случайные величины, входящие в вектор  $\mathbf{z}_{\text{МНК}}$ , полагались распределенными по гауссовскому закону:

$$\hat{\tau}_1 \approx N(\tau_1, \sigma_\tau^2); \quad \hat{\tau}_2 \approx N(\tau_2, \sigma_\tau^2); \quad \hat{\rho}_1 \approx N(\rho_1, \sigma_\rho^2); \quad \hat{\rho}_2 \approx N(\rho_2, \sigma_\rho^2), \quad (27)$$

где  $\sigma_\tau^2$  – дисперсия измерения разностей дальностей  $\tau_1, \tau_2$  ( $\sigma_\tau = 0,001$ );  $\sigma_\rho^2$  – дисперсия измерения сумм дальностей  $\rho_1, \rho_2$  ( $\sigma_\rho = 0,02$ ).

Среднеквадратическое отклонение (СКО)  $\sigma_\tau$  задано из расчета СКО измерения разности дальностей  $\Delta d$  до навигационной системы в 1 м при ширине наименьшей базы навигационной системы, равной 2000 м. Статистические характеристики величины  $\rho$  приведены в [12]. СКО  $\sigma_\rho$  получено методом Монте-Карло для  $\sigma_\tau = 0,001$ , скорости движения объекта  $V_0 = 200$  м/с, СКО оценки скорости движения объекта  $\sigma_{V_0} = 1$  м/с.

На рис. 6 приведена одна из реализаций траектории движения объекта, наводимого вдоль гиперболы по информации разностно-дальномерной навигационной системы, полученная путем численного моделирования. Длины баз навигационной системы полагались равными 2000 м, расположенные под прямым углом друг к другу с координатами:  $x_{\Pi_0} = 0$  м,  $y_{\Pi_0} = 0$  м,  $z_{\Pi_0} = 0$  м,  $x_{\Pi_1} = 2000$  м,  $y_{\Pi_1} = 0$  м,  $z_{\Pi_1} = 0$  м,  $x_{\Pi_2} = 0$  м,  $y_{\Pi_2} = 0$  м,  $z_{\Pi_2} = 2000$  м. Точка цели имела следующие координаты:  $x_{\Pi} = 2000$  м,  $y_{\Pi} = -2000$  м,  $z_{\Pi} = 2000$  м.

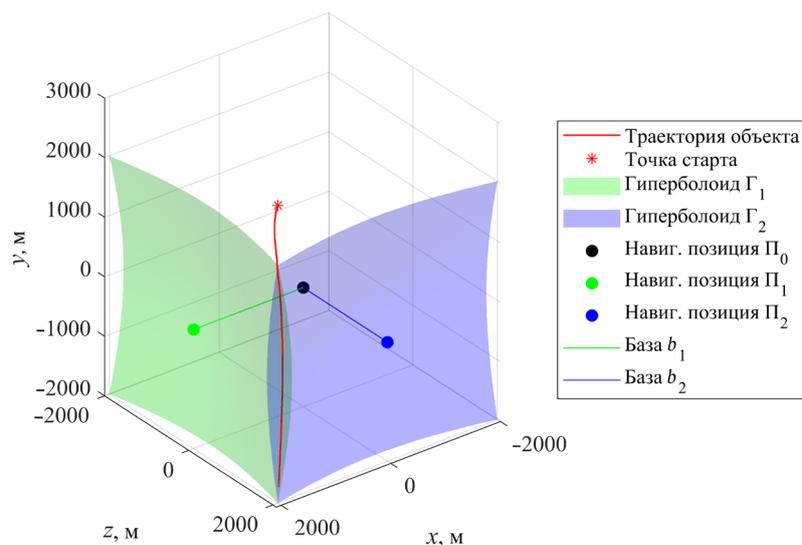


Рис. 6. Траектория движения объекта в навигационной системе, полученная с помощью численного эксперимента

Fig. 6. The trajectory of the object in the navigation system, obtained by numerical experiment

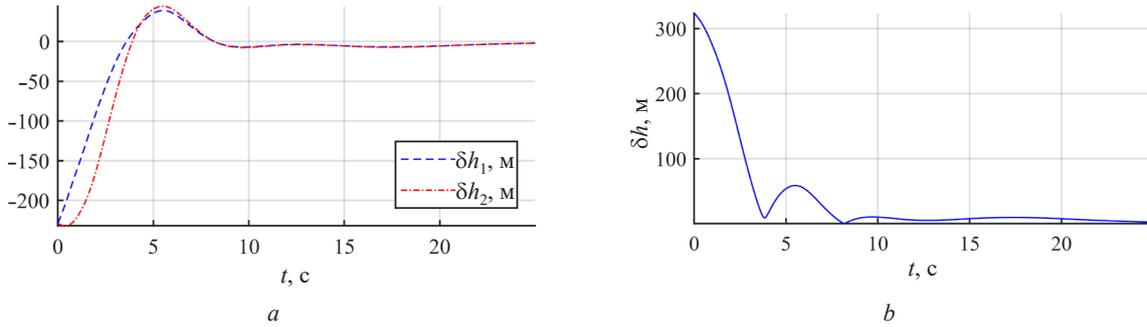


Рис. 7. Зависимости от времени линейных промахов  $\delta h_1$ ,  $\delta h_2$  объекта в двух каналах управления (а) и полного промаха  $\delta h$  (б)

Fig. 7. Time dependence of the object linear errors  $\delta h_1$ ,  $\delta h_2$  in each control channel (a) and full error  $\delta h$  (b)

На рис. 7, а приведены временные зависимости промахов  $\delta h_1$ ,  $\delta h_2$  двух измерительных каналов, соответствующих отклонениям объекта от гиперболоидов положения, выраженных в линейной мере с помощью соотношений:

$$\begin{aligned} \delta h_1 &= c_1 \rho_1 (\tau_1^* - \tau_1); \\ \delta h_2 &= c_2 \rho_2 (\tau_2^* - \tau_2), \end{aligned} \quad (28)$$

где  $\tau_1^*$ ,  $\tau_2^*$  – разностно-дальномерные параметры положения точки цели в двух каналах управления.

На рис. 7, б приведена временная зависимость полного промаха  $\delta h$ , вычисленного на основании выражения

$$\delta h = \sqrt{\delta h_1^2 + \delta h_2^2}. \quad (29)$$

При моделировании движения объекта предполагалось, что объект способен развивать максимальное ускорение в 5g, или 50 м/с<sup>2</sup>. Временные зависимости ускорений объекта в двух взаимно перпендикулярных плоскостях представлены на рис. 8.

**Заключение.** Получены в замкнутой форме выражения, описывающие кинематические ускорения объекта в измерительной и исполнительной (связанной) системы координат. Выполнено имитационное моделирование, результаты которого подтвердили работоспособность предлагаемого способа управления объектом в пространстве. Анализ результатов моделирования показывает, что компенсация пространственной связи каналов управления обеспечивает устойчивость контура наведения. Реализация пространственного наведения объекта по двум разностно-дальномерным измерениям позволяет снизить количество навигационных позиций на одну, что эквивалентно уменьшению необходимого числа измерительных каналов.

### Список использованных источников

1. Powell, C. Hyperbolic origins / C. Powell // Journal of Navigation. – 1981. – Vol. 34, iss. 4. – P. 424–436. <https://doi.org/10.1017/S0373463300048049>
2. Blanchard, W. Air Navigation Systems. Chapter 4. Hyperbolic Airborne Radio Navigation Aids – A Navigator’s View of their History and Development / W. Blanchard // Journal of Navigation. – 1991. – Vol. 44, iss. 3. – P. 285–315. <https://doi.org/10.1017/S0373463300010092>
3. Groves, P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems / P. D. Groves. – 2<sup>nd</sup> ed. – Artech House, 2013. – 776 p.
4. An Evaluation of eLoran as a Backup to GPS / G. W. Johnson [et al.] // IEEE Conf. on Technologies for Homeland Security, 16–17 May 2007, Woburn, MA, USA. – P. 95–100. <http://doi.org/10.1109/THS.2007.370027>
5. Czaplewski, K. Does Poland need eLoran? / K. Czaplewski // Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Transport System Telematics (TST 2018), March 20–23, 2018. – Krakow, 2018. – P. 525–544. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97955-7\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97955-7_35)

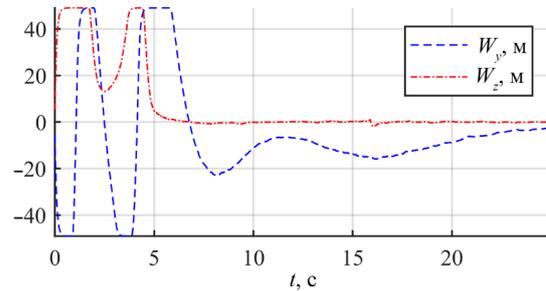


Рис. 8. Зависимость вертикального  $W_y$  и бокового  $W_z$  ускорений объекта от времени

Fig. 8. Time dependence of the vertical  $W_y$  and lateral  $W_z$  accelerations of the object

6. Легкоступ, В. В. Методика определения кинематической связи между управляющим летательным аппаратом ускорениями и его эллиптическими координатами в альтернативном представлении / В. В. Легкоступ // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2021. – № 3. – С. 15–24. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2021-3-15-24>

7. Легкоступ, В. В. Методика синтеза устройства управления по методу аналитического конструирования оптимального регулятора для задачи наведения летательного аппарата вдоль гиперболы / В. В. Легкоступ, С. А. Шабан, В. Е. Маркевич // Докл. БГУИР. – 2022. – Т. 20, № 1. – С. 65–72. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-65-72>

8. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1970. – 832 с.

9. Кун, А. А. Основы построения систем управления ракетами: в 3 ч. / А. А. Кун, В. Ф. Лукьянов, С. А. Шабан. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2001. – 3 ч.

10. Легкоступ, В. В. Методика определения дальности до объекта в разностно-дальномерной навигационной системе по доплеровским смещениям частоты / В. В. Легкоступ, В. Е. Маркевич // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2021. – № 4. – С. 40–46. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2021-4-40-46>

11. Степанов, О. А. Методы обработки навигационной измерительной информации / О. А. Степанов. – СПб.: Ун-т ИТМО, 2017. – 196 с.

12. Легкоступ, В. В. Методика определения статистических характеристик оценки дальности по доплеровским смещениям частоты / В. В. Легкоступ // Систем. анализ и приклад. информатика. – 2022. – № 1. – С. 20–26. <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-1-20-26>

## References

1. Powell C. Hyperbolic origins. *Journal of Navigation*, 1981. vol. 34, iss. 4, pp. 424–436. <https://doi.org/10.1017/S0373463300048049>

2. Blanchard W. Air Navigation Systems. Chapter 4. Hyperbolic Airborne Radio Navigation Aids – A Navigator’s View of their History and Development. *Journal of Navigation*, 1991, vol. 44, iss. 3, pp. 285–315. <https://doi.org/10.1017/S0373463300010092>

3. Groves P. D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. 2<sup>nd</sup> ed. Artech House, 2013. 776 p.

4. Johnson G. W., Swaszek P. F., Hartnett R. J., Shalaev R., Wiggins M. *IEEE Conference on Technologies for Homeland Security, 16–17 May 2007, Woburn, MA, USA*, pp. 95–100. <http://doi.org/10.1109/THS.2007.370027>

5. Czaplewski K. Does Poland need eLoran? *Proceedings of the 18<sup>th</sup> International Conference on Transport System Telematics (TST 2018), March 20–23, 2018*. Krakow, 2018, pp. 525–544. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-97955-7\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97955-7_35)

6. Legkostup V. V. Methodology of determining of the transfer function of engagement kinematics of accelerations of an aircraft and its elliptic coordinates in alternative representation. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Applied Information Science*, 2021, no. 3, pp. 15–24 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2021-3-15-24>

7. Legkostup V. V., Shaban S. A., Markevich V. E. Procedure of the Synthesis of Control Device by the Method of Analytical Design of the Optimal Regulator for the Problem of Aircraft Guidance Along a Hyperbola. *Doklady BGUIR*, 2022, vol. 20, no. 1, pp. 65–72 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-1-65-72>

8. Korn G., Korn T. *Handbook of Mathematics for Scientists and Engineers*. Moscow, Nauka Publ., 1970. 832 p. (in Russian).

9. Kun A. A., Luk’yanov V. F., Shaban S. A. *Fundamentals of Building Missile Control Systems*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus, 2001. 3 chapters (in Russian).

10. Legkostup V. V., Markevich V. E. Method for determining of the distance to the object in the hyperbolic navigation system via doppler frequency offsets. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Applied Information Science*, 2021, no. 4, pp. 40–46 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2021-4-40-46>

11. Stepanov O. A. *Estimation Algorithms for Navigation Data Processing*. St. Petersburg, ITMO University Publ., 2021. 174 p. (in Russian).

12. Legkostup V. V. Method for determining of statistical characteristics of evaluated distance obtained from measurements of Doppler frequency offsets. *Sistemnyi analiz i prikladnaya informatika = System Analysis and Applied Information Science*, 2022, no. 1, pp. 20–26 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/2309-4923-2022-1-20-26>

## Информация об авторе

Легкоступ Виктор Валерьевич – научный сотрудник, ОАО «АЛЕВКУРП» (ул. Московская, 1а, 223027, д. Королев Стан, Минский район, Минская область, Республика Беларусь). E-mail: legkostupvv@gmail.com

## Information about the author

Victor V. Legkostup – Researcher, JSC “ALEVKURP” (1a, Moscovskaya Str., 223027, village Korolev Stan, Minsk District, Minsk Region, Republic of Belarus). E-mail: legkostupvv@gmail.com

## ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

### DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

УДК 614.876:621.039.58:004.94(476)  
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-421-432>

Поступила в редакцию 24.08.2022  
Received 24.08.2022

В. В. Кляус<sup>1</sup>, О. М. Жукова<sup>1</sup>, Е. В. Николаенко<sup>1</sup>, А. М. Шайбак<sup>2</sup>, А. В. Трусов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-практический центр гигиены, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения  
и мониторингу окружающей среды, Минск, Республика Беларусь

### СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ НА БЕЛОРУССКОЙ АЭС С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ J-RODOS И RECASS-ЭКСПРЕСС

**Аннотация.** С помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС проведено моделирование радиологических и радиационно-экологических последствий тяжелой запроектной аварии на энергоблоке Белорусской АЭС с реактором типа ВВЭР-1200. Результаты моделирования показали, что при выбросе радионуклидов из защитной оболочки реактора общим выбросом  $2,15 \cdot 10^{15}$  Бк максимальные значения плотности выпадений из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения аварии составят для I-131  $2,98 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>2</sup> (J-RODOS) и  $7 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>2</sup> (RECASS-ЭКСПРЕСС), а Cs-137 –  $1,11 \cdot 10^4$  Бк/м<sup>2</sup> и  $1,3 \cdot 10^5$  Бк/м<sup>2</sup> соответственно. Разница в значении плотности выпадений радионуклидов, смоделированная данными программными комплексами, увеличивается с расстоянием от источника выброса и на расстоянии более 10 км составляет 1 порядок величины. Прогнозируемые значения эквивалентной дозы облучения щитовидной железы взрослых и детей за первые 7 сут после аварии, полученные с помощью расчетов J-RODOS, в 3–4 раза выше, чем с использованием программного продукта RECASS-ЭКСПРЕСС. На расстоянии 3–5 км от площадки АЭС дозы составили от 3,7 до 14,8 мЗв у взрослых и от 16,2 до 32,5 мЗв у детей. Значения общей эффективной дозы при моделировании J-RODOS в 2 раза выше, чем у RECASS-ЭКСПРЕСС, на расстоянии 3 км от площадки (0,60 и 0,32 мЗв соответственно) и в 1,5 раза выше на расстоянии 5 км от площадки (0,30 и 0,21 мЗв соответственно). С увеличением расстояния от АЭС сходимость в полученных результатах оценки общей эффективной дозы увеличивается. Ни один из полученных результатов прогнозирования не превышает установленных критериев аварийного реагирования и не указывает на необходимость проведения защитных мероприятий для населения.

**Ключевые слова:** Cs-137, I-131, J-RODOS, RECASS-ЭКСПРЕСС, авария, Белорусская АЭС, доза облучения, защитные меры, население, плотность выпадений

**Для цитирования:** Сравнительный анализ результатов моделирования последствий тяжелой аварии на Белорусской АЭС с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС / В. В. Кляус [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 4. – С. 421–432. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-421-432>

Viktoriya V. Kliaus<sup>1</sup>, Olga M. Zhukova<sup>1</sup>, Alena U. Nikalayenka<sup>1</sup>, Alla M. Shaibak<sup>2</sup>, Aliaksandr V. Trusau<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Scientific-Practical Center of Hygiene, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring,  
Minsk, Republic of Belarus

### COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RESULTS OF SIMULATION OF THE CONSEQUENCES OF A SERIOUS ACCIDENT AT A BELARUSIAN NPP WITH THE USE OF J-RODOS AND RECASS-EXPRESS SOFTWARE COMPLEXES

**Abstract.** Using the J-RODOS and RECASS-EXPRESS software packages, modeling of the radiological and radiation-ecological consequences of a severe beyond design basis accident at the power unit of the Belarusian NPP with a VVER-

1200 reactor was carried out. The simulation results showed that if radionuclides were released from the reactor containment at the level of  $2.15 \cdot 10^{15}$  Bq, the maximum values of the fallout from the atmosphere to the surface 1 day after the accident will be  $2.98 \cdot 10^5$  Bq/m<sup>2</sup> for I-131 (J-RODOS) and  $7 \cdot 10^5$  Bq/m<sup>2</sup> (RECASS-EXPRESS), and for Cs-137 –  $1.11 \cdot 10^4$  Bq/m<sup>2</sup> and  $1.3 \cdot 10^5$  Bq/m<sup>2</sup>, respectively. The difference in the values of the radionuclide fallout, modeled by these software packages, increases with the distance from the release source and at a distance of more than 10 km reaches 1 order of magnitude. The predicted values of the equivalent thyroid dose for adults and children for the first 7 days after the accident, obtained using J-RODOS calculations, are 3–4 times higher than using RECASS-EXPRESS software product. At a distance of 3–5 km from the NPP site, doses ranged from 3.7 to 14.8 mSv for adults and 16.2 to 32.5 mSv for children. The values of the total effective dose with the J-RODOS simulation are 2 times higher than those with RECASS-EXPRESS at a distance of 3 km from the site (0.60 and 0.32 mSv, respectively) and 1.5 times higher at a distance of 5 km from the site (0.30 and 0.21 mSv respectively). As the distance from the NPP increases, the convergence in the obtained evaluation results of total effective dose increases. None of the obtained prediction results exceeds the established emergency response criteria and do not indicate the need for protective measures for the public.

**Keywords:** Cs-137, I-131, J-RODOS, RECASS-EXPRESS, emergency, Belarusian NPP, exposure dose, protective actions, public, fallout

**For citation:** Kliaus V. V., Zhukova O. M., Nikalayenka A. U., Shaibak A. M., Trusau A. V. Comparative analysis of the results of simulation of the consequences of a serious accident at a Belarusian NPP with the use of J-RODOS and RECASS-EXPRESS software complexes. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 4, pp. 421–432 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-4-421-432>

**Введение.** В связи с пуском в эксплуатацию первой в Республике Беларусь атомной электростанции (Белорусской АЭС) возникает необходимость в оценке возможных радиологических и радиационно-экологических последствий аварий различной степени тяжести для обеспечения готовности к аварийному реагированию в соответствии с национальным законодательством и международными требованиями<sup>1</sup>. В Республике Беларусь в системе ситуационно-кризисных центров (далее – СКЦ) используются два программных комплекса, которые предназначены для поддержки принятия решений при управлении радиационными авариями за пределами площадки АЭС, – J-RODOS (СКЦ Министерства здравоохранения Республики Беларусь на базе Научно-практического центра гигиены) и RECASS-ЭКСПРЕСС (СКЦ Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь на базе Республиканского центра по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (далее – Белгидромет)).

Данные программные комплексы ежегодно используются при проведении аварийных учений и тренировок для численной оценки возможных уровней загрязнения окружающей среды и ожидаемых доз облучения населения при гипотетической аварии на Белорусской АЭС. Так как в основу программных комплексов заложены различные модели распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и миграции радионуклидов, а также различные методы оценки ожидаемых доз облучения населения, возникает необходимость проведения сравнения и анализа результатов моделирования с помощью данных программных комплексов. Результаты прогнозирования последствий аварии с помощью моделей позволяют на количественном уровне определить необходимость проведения защитных мероприятий в случае аварии на АЭС.

**Материалы и методы.** Для прогнозирования последствий тяжелой запроектной аварии (далее – ТЗА) на Белорусской АЭС использовались программный комплекс J-RODOS (Java-based Realtime Online Decision Support System)<sup>2</sup>, разработанный Технологическим институтом Карлсруе, и программный комплекс RECASS<sup>3</sup>, разработанный НПО «Тайфун» и предназначенный для поддержки принятия решений в задачах радиоэкологического анализа и прогностических оценок радиоактивного загрязнения окружающей среды при радиационных авариях.

В основе программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС заложены сходные модели атмосферного переноса примеси на расстоянии до 50 км от источника выброса (модель ат-

<sup>1</sup> Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7. Vienna: IAEA, 2015. 102 p. ; Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213 // Радиационная гигиена: сб. норм. док. Минск: РЦГЭиОЗ, 2013. С. 35–167.

<sup>2</sup> JRodos: An off-site emergency management system for nuclear accidents. Karlsruhe: Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 2017. 22 p.

<sup>3</sup> Система информационной поддержки принятия решений в случае аварийных ситуаций на радиационно- и химически опасных объектах RECASS. Экспресс. Оценка последствий атмосферного выброса радиоактивности в случае аварии на радиационно-опасном объекте: руководство пользователя. URL: [https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/f3e/RECASS\\_Express\\_8\\_Manual.pdf](https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/f3e/RECASS_Express_8_Manual.pdf) (дата обращения 01.08.2022).

мосферной дисперсии Гаусса) [1], есть возможность учета физико-химического состава выброса и высоты источника выброса (приземный или высотный), метеорологических условий (класс стабильности атмосферы, скорость и направление ветра, температура воздуха, осадки и др.), ландшафтно-географических условий (координаты площадки, тип подстилающей поверхности и др.). Основные модели и допущения, используемые в программных комплексах J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС, описаны в соответствующих руководствах.

В качестве входных данных J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС используют параметры источника (выброс радионуклидов), координаты площадки АЭС и метеоусловия, что позволяет спрогнозировать значения следующих параметров:

- объемная активность радионуклидов в объектах окружающей среды;
- интегральная концентрация радионуклидов;
- время прибытия радиоактивного облака и мощность дозы гамма-излучения на местности (J-RODOS);
- поверхностная активность (плотность выпадений радионуклидов на поверхность земли);
- средняя относительная биологическая эффективность излучений – взвешенная поглощенная доза облучения красного костного мозга (далее – доза облучения красного костного мозга);
- эквивалентная доза облучения щитовидной железы взрослых (от 12 до 45 лет) и детей (до 12 лет);
- доза облучения от облака, формируемая вследствие внешнего облучения от проходящего радиоактивного облака;
- доза от выпадений, формируемая вследствие внешнего облучения от выпадений;
- эффективная доза от ингаляционного поступления радионуклидов;
- общая эффективная доза, которая в данном случае складывается из эффективной дозы от ингаляции, дозы вследствие облучения от облака и дозы, сформированной от выпадений;
- необходимость применения мер защиты (контрмер): J-RODOS использует численные значения уровней вмешательства, рекомендованные МАГАТЭ<sup>1</sup>, либо национальные значения<sup>2</sup> (которые задаются пользователем); RECASS-ЭКСПРЕСС – критерии согласно НРБ 99/2009<sup>3</sup> либо национальные значения<sup>4</sup>;
- дозы облучения населения с учетом применяемых контрмер (J-RODOS).

Для проведения сравнительной оценки результатов моделирования радиологических и радиационно-экологических последствий аварии на Белорусской АЭС с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС выбран реперный сценарий ТЗА в соответствии с внешним аварийным планом Белорусской АЭС<sup>5</sup>. В качестве реперного сценария ТЗА принята авария с большой течью теплоносителя первого контура с отказом активной части системы аварийного охлаждения зоны и дополнительным наложением полного обесточивания АЭС в первые 24 ч (табл. 1). Данная авария приводит к предельному выбросу.

Для моделирования переноса радионуклидов в атмосфере и прогноза радиоактивных выпадений выбран метеорологический сценарий, характерный для летнего периода на основании анализа данных многолетних наблюдений (с 1999 по 2018 г.), предоставленных Белгидрометом для метеостанции Лынтупы, а ландшафтные условия – характерные для Островецкой площадки (табл. 2).

<sup>1</sup> Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7 ; Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions 2013. Vienna: IAEA, 2015. 145 p.

<sup>2</sup> Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213.

<sup>3</sup> Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009): санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/56/56325/index.htm> (дата обращения 01.08.2022).

<sup>4</sup> Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213.

<sup>5</sup> План защитных мероприятий при радиационной аварии на Белорусской атомной электростанции (внешний аварийный план): утв. постановлением Совета Министров Республики Беларусь 22 марта 2018 г. № 211. URL: <https://energodoc.by/document/view?id=3245> (дата обращения 01.06.2021).

Т а б л и ц а 1. Параметры реперного сценария тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, использованные при расчете аварийного выброса радионуклидов

T a b l e 1. Parameters of the reference scenario of the beyond design basis accident at the Belarusian NPP used in the calculation of the accidental release of radionuclides

Параметр	Значение
Мощность реактора	3200 МВт (полная)
Система охлаждения	Отключена через 3ч
	Включена через 24 ч
Активная зона	Расплавление
Защитная оболочка	Не нарушена
Свободный объем контайнмента	74530 м <sup>3</sup>
Негерметичность контайнмента	0,2 % от объема в сутки
	0,1 % от объема в сутки
Байпас контайнмента	1 % от интегральной неплотности контайнмента
Байпас фильтров	1 %
Продолжительность выброса	10 ч
Фракции выброса йода	95 % – аэрозоли;
	4,85 % – молекулярный йод;
	0,15 % – органические соединения
Высота выброса	30 м

Т а б л и ц а 2. Ландшафтно-метеорологические условия, использованные при расчете аварийного выброса радионуклидов при тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС

T a b l e 2. Landscape and meteorological conditions used in the calculation of the accidental release of radionuclides during beyond design basis accident at the Belarusian NPP

Параметр	Значение
Направление ветра, °	110
Скорость ветра, м/с	2
Категория устойчивости атмосферы	D
Высота слоя перемешивания, м	400
Осадки, мм	0
Температура воздуха, °С	+20
Влажность воздуха, %	70
Шероховатость, м	0,1
Высота флюгера, м	10

Выброс радионуклидов в окружающую среду при ТЗА на Белорусской АЭС рассчитан с помощью программного кода InterRas (The International Radiological Assessment System), разработанного МАГАТЭ и предназначенного для использования специалистами, которые выполняют оценку радиологических аварий [2]. Согласно расчетам значение общей активности аварийного выброса составило  $2,15 \cdot 10^{15}$  Бк (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. Расчетный выброс радионуклидов в атмосферу при тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС

T a b l e 3. Calculated release of radionuclides into the atmosphere during beyond design basis accident at the Belarusian NPP

Радионуклид	Активность, Бк	Радионуклид	Активность, Бк
Cs-134	$9,90 \cdot 10^{12}$	Kr-85m	$4,30 \cdot 10^{13}$
Cs-136	$2,00 \cdot 10^{12}$	Kr-87	$2,20 \cdot 10^{13}$
Cs-137	$6,90 \cdot 10^{12}$	Kr-88	$7,40 \cdot 10^{13}$
Cs-138	$6,90 \cdot 10^{12}$	Rb-86	$7,10 \cdot 10^{13}$
I-131	$3,60 \cdot 10^{13}$	Rb-88	$6,10 \cdot 10^{13}$
I-132	$3,00 \cdot 10^{13}$	Xe-131m	$9,60 \cdot 10^{12}$
I-133	$6,50 \cdot 10^{13}$	Xe-133	$1,40 \cdot 10^{15}$
I-134	$2,30 \cdot 10^{13}$	Xe-133m	$4,00 \cdot 10^{13}$
I-135	$5,00 \cdot 10^{13}$	Xe-135	$2,40 \cdot 10^{14}$
Kr-83m	$8,20 \cdot 10^{12}$	Xe-135m	$1,30 \cdot 10^{13}$
Kr-85	$1,20 \cdot 10^{13}$	Xe-138	$6,00 \cdot 10^{12}$

Для раннего этапа аварии проведено моделирование выпадений основных дозообразующих радионуклидов I-131 и Cs-137, сделан расчет ожидаемых эффективных доз облучения для взрослых и эквивалентных доз облучения щитовидной железы взрослых и детей.

В основе прогнозирования содержания радионуклидов в воздухе и на поверхности земли на расстоянии до 50 км в обоих программных комплексах лежит Гауссова модель [1], поэтому результаты моделирования сравнивались для диапазона расстояний от 2 км (за пределами границы площадки АЭС) до 50 км.

**Результаты.** Полученные с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС результаты моделирования выпадений радионуклидов из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения ТЗА на Белорусской АЭС приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4. Прогноз плотности выпадений I-131 и Cs-137 на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС

Table 4. Prediction of the fallout of I-131 and Cs-137 on the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP

Расстояние от площадки, км	J-RODOS, Бк/м <sup>2</sup>		RECASS-ЭКСПРЕСС, Бк/м <sup>2</sup>	
	I-131	Cs-137	I-131	Cs-137
3	2,98·10 <sup>5</sup>	1,11·10 <sup>4</sup>	7·10 <sup>5</sup>	1,3·10 <sup>5</sup>
5	1,50·10 <sup>5</sup>	6,05·10 <sup>3</sup>	4,7·10 <sup>5</sup>	9,0·10 <sup>4</sup>
10	1,47·10 <sup>4</sup>	1,21·10 <sup>3</sup>	2,1·10 <sup>5</sup>	4,1·10 <sup>4</sup>
15	8,48·10 <sup>3</sup>	7,18·10 <sup>2</sup>	1,3·10 <sup>5</sup>	2,5·10 <sup>4</sup>
20	5,19·10 <sup>3</sup>	4,31·10 <sup>2</sup>	8,8·10 <sup>4</sup>	1,7·10 <sup>4</sup>
25	3,12·10 <sup>3</sup>	2,80·10 <sup>2</sup>	6,7·10 <sup>4</sup>	1,3·10 <sup>4</sup>
30	2,29·10 <sup>3</sup>	2,04·10 <sup>2</sup>	5,3·10 <sup>4</sup>	1,0·10 <sup>4</sup>
35	1,66·10 <sup>3</sup>	1,65·10 <sup>2</sup>	–	–
40	1,30·10 <sup>3</sup>	1,33·10 <sup>2</sup>	3,7·10 <sup>4</sup>	7,4·10 <sup>3</sup>
45	1,19·10 <sup>3</sup>	1,35·10 <sup>2</sup>	–	–
50	1,09·10 <sup>3</sup>	1,29·10 <sup>2</sup>	2,9·10 <sup>4</sup>	5,7·10 <sup>3</sup>

Согласно расчетным данным максимальные значения плотности выпадения I-131 и Cs-137 на расстоянии 3 км через 1 сут с момента возникновения ТЗА на Белорусской АЭС составят 298 кБк/м<sup>2</sup> и 11,1 кБк/м<sup>2</sup> при моделировании с помощью J-RODOS и 700 кБк/м<sup>2</sup> и 130 кБк/м<sup>2</sup> – при моделировании RECASS-ЭКСПРЕСС соответственно (см. табл. 4).

Прогнозируемые значения выпадений радионуклидов являются незначительными и не требуют дополнительных защитных мер на этой территории. Например, дезактивационные работы проводить не потребуется, однако обязательно проведение радиационного аварийного мониторинга. Для сравнения: при аварии на Чернобыльской АЭС, суммарная активность выброса радионуклидов при которой оценивается величиной порядка 10<sup>19</sup> Бк, активность выброшенного I-131 составила (1,2–1,7)·10<sup>18</sup> Бк, Cs-137 – 3,7·10<sup>16</sup> Бк [3, табл. 6]. При этом на ближнем следе (до 40 км от места аварии) выпало 5,1 % I-131 (1,3·10<sup>6</sup> Ки, или 4,81·10<sup>16</sup> Бк) и 1,9 % Cs-137 (2,8·10<sup>5</sup> Ки, или 1,04·10<sup>16</sup> Бк). Существующие уровни радиоактивного загрязнения территории Гродненской области Cs-137 после аварии на Чернобыльской АЭС находятся в диапазоне от 37 до 185 кБк/м<sup>2</sup> (плотность загрязнения территории по состоянию на 2015 г.) [4, с. 35–37].

Анализ результатов прогнозирования плотности выпадений I-131 на подстилающую поверхность показал хорошую сходимость расчетных данных, полученных различными программными комплексами в непосредственной близости от источника выброса (3–5 км от источника). Так, на расстоянии свыше 10 км разница в результатах, полученных с помощью RECASS-ЭКСПРЕСС, на 1 порядок величины выше, чем J-RODOS. Для итоговых значений прогнозирования плотности выпадений Cs-137 расхождение в полученных результатах на 1 порядок величины наблюдается на всех расстояниях от источника выброса.

Прогнозируемые значения эквивалентной дозы облучения щитовидной железы взрослых ( $E_{inh\text{ в зр}}$ ) и детей ( $E_{inh\text{ дети}}$ ), а также общей эффективной дозы облучения взрослых ( $E_{total}$ ) за первые 7 сут после аварии, рассчитанные с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС, представлены в табл. 5 и на рис. 5–9.

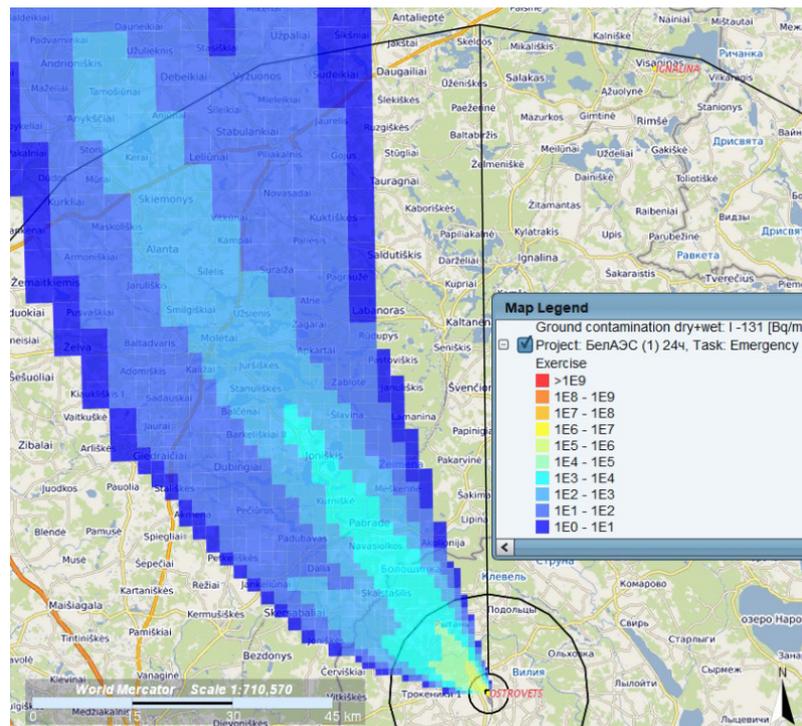


Рис. 1. Прогноз с использованием программного комплекса J-RODOS плотности выпадений I-131 из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, Бк/м<sup>2</sup>

Fig. 1. Predication using the J-RODOS software package of the fallout of I-131 from the atmosphere onto the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m<sup>2</sup>

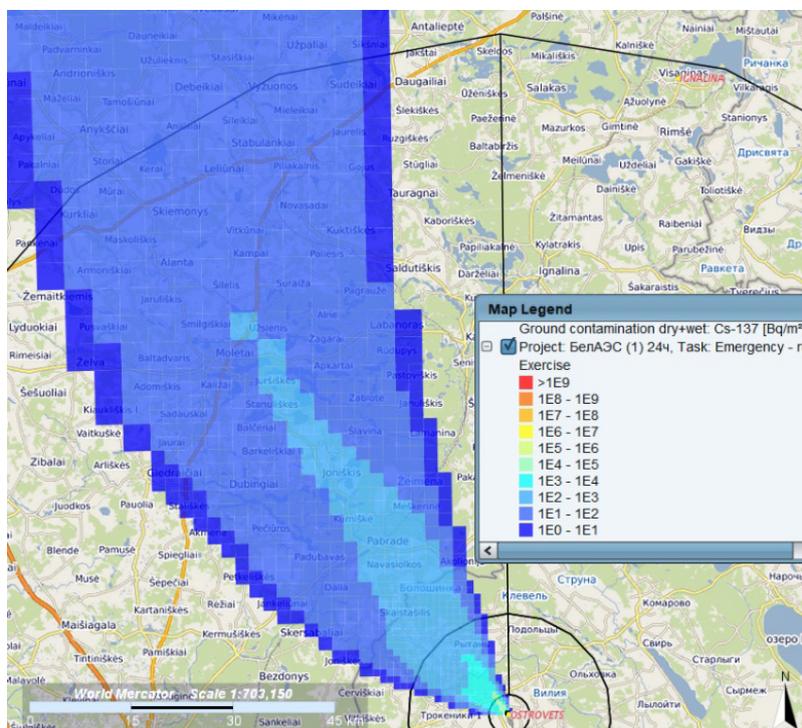


Рис. 2. Прогноз с использованием программного комплекса J-RODOS плотности выпадений Cs-137 из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, Бк/м<sup>2</sup>

Fig. 2. Predication using the J-RODOS software package of the fallout of Cs-137 from the atmosphere onto the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m<sup>2</sup>

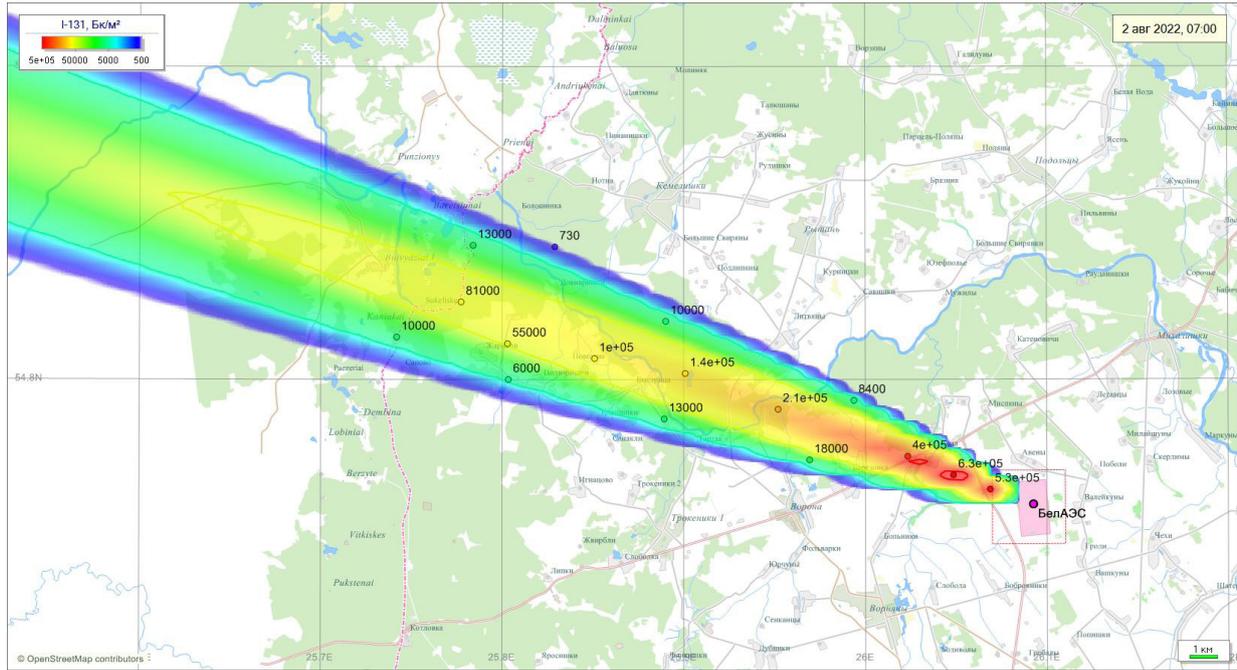


Рис. 3. Прогноз с использованием программного комплекса RECASS-ЭКСПРЕСС плотности выпадений I-131 из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, Бк/м<sup>2</sup>

Fig. 3. Prediction using the RECASS-EXPRESS software package of the fallout of I-131 from the atmosphere onto the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m<sup>2</sup>

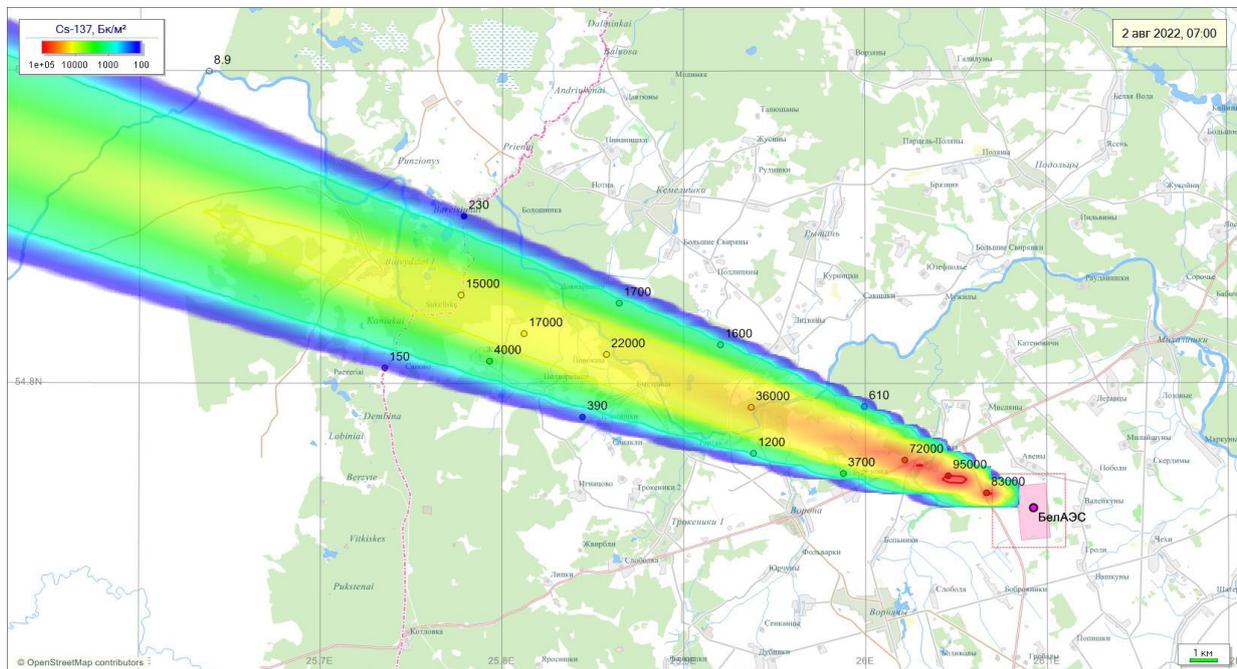


Рис. 4. Прогноз с использованием программного комплекса RECASS-ЭКСПРЕСС плотности выпадений Cs-137 из атмосферы на подстилающую поверхность через 1 сут с момента возникновения тяжелой запроектной аварии на Белорусской АЭС, Бк/м<sup>2</sup>

Fig. 4. Prediction using the RECASS-EXPRESS software package of the fallout of Cs-137 from the atmosphere onto the underlying surface in 1 day after the occurrence of beyond design basis accident at the Belarusian NPP, Bq/m<sup>2</sup>

Т а б л и ц а 5. Прогнозируемые значения эквивалентной дозы облучения щитовидной железы и общей эффективной дозы за первые 7 сут после аварии, рассчитанные с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС

Table 5. Predicted values of the equivalent dose to the thyroid gland and total effective dose for the first 7 days after the accident, calculated using the J-RODOS and RECASS-EXPRESS software packages

Расстояние от площадки, км	J-RODOS			RECASS-ЭКСПРЕСС		
	$E_{inh\text{ в з р}}$	$E_{inh\text{ д е т и}}$	$E_{total}$	$E_{inh\text{ в з р}}$	$E_{inh\text{ д е т и}}$	$E_{total}$
3	14,8	32,5	14,8	3,7	8	0,320
5	7,34	16,2	7,34	2,5	5,30	0,210
10	1,1	2,43	1,1	1,1	2,40	0,095
15	0,683	1,5	0,683	0,67	1,40	0,057
20	0,413	0,908	0,413	0,46	0,99	0,040
25	0,252	0,554	0,252	0,35	0,75	0,030
30	0,197	0,433	0,197	0,28	0,60	0,024
40	0,126	0,278	0,157	0,2	0,42	0,017
50	0,120	0,265	0,126	0,15	0,32	0,013

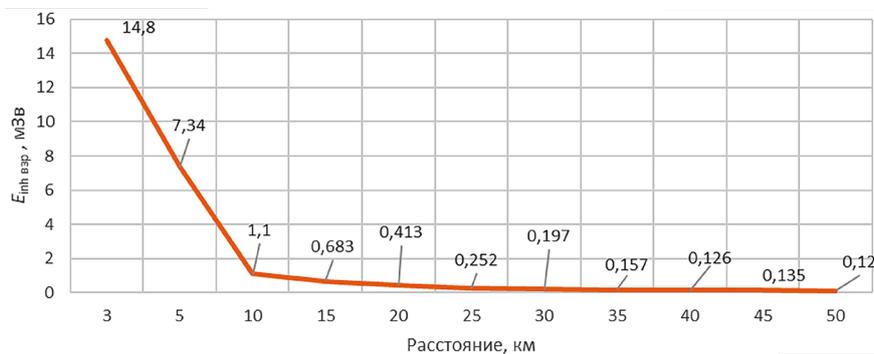


Рис. 5. Изменение эквивалентных доз облучения щитовидной железы взрослых с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программного комплекса J-RODOS

Fig. 5. Change in the equivalent doses to the thyroid gland of adults with the distance from the NPP site according to the results of modeling using the J-RODOS software package

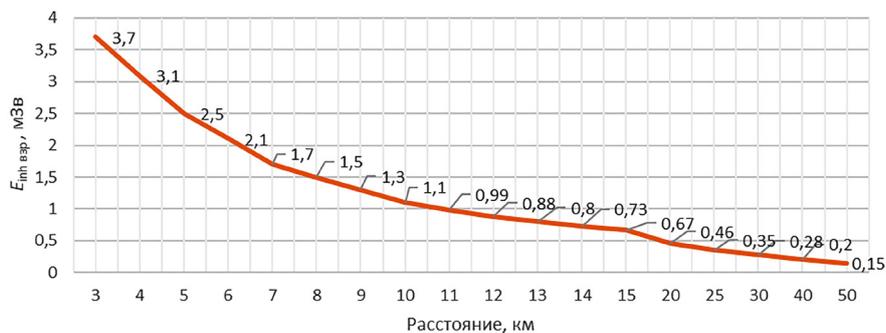


Рис. 6. Изменение эквивалентных доз облучения щитовидной железы взрослых с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программного комплекса RECASS-ЭКСПРЕСС

Fig. 6. Change in the equivalent doses to the thyroid gland of adults with the distance from the NPP site according to the results of modeling using the RECASS-EXPRESS software package

В ближней зоне (на расстоянии до 10 км от площадки АЭС) разница значениях эквивалентных доз облучения щитовидной железы взрослых и детей, полученных J-RODOS, в 3–4 раза выше, чем RECASS-ЭКСПРЕСС: у взрослых 14,8 мЗв J-RODOS и 3,7 мЗв RECASS-ЭКСПРЕСС на расстоянии 3 км и 7,34 мЗв J-RODOS и 2,5 мЗв RECASS-ЭКСПРЕСС на расстоянии 5 км; у детей 32,5 и 16,2 мЗв J-RODOS и 8 и 5,3 мЗв RECASS-ЭКСПРЕСС соответственно. На расстояниях от 10 до 50 км результаты моделирования различаются незначительно (до 1,5 раза в отдельных точках) (см. рис. 5–8).

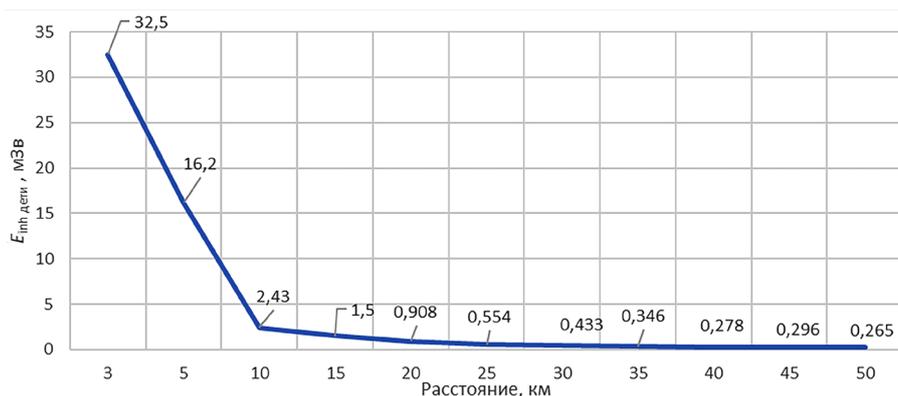


Рис. 7. Изменение эквивалентных доз облучения щитовидной железы детей с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программного комплекса J-RODOS

Fig. 7. Change in the equivalent doses to the thyroid gland of children with the distance from the NPP site according to the results of modeling using the J-RODOS software package

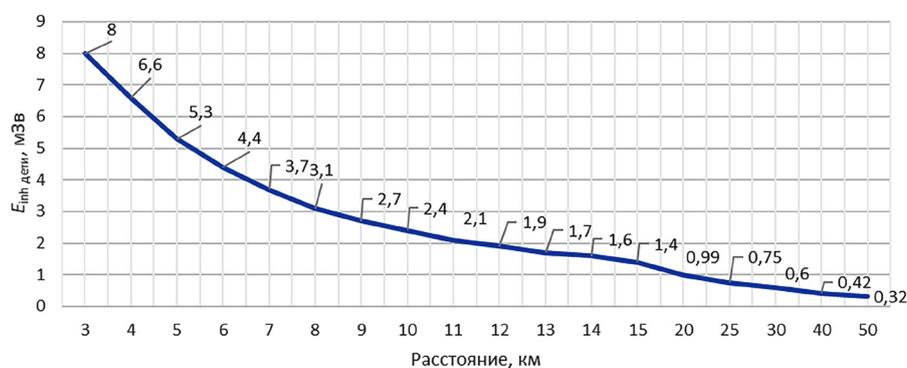


Рис. 8. Изменение эквивалентных доз облучения щитовидной железы детей с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программного комплекса RECASS-ЭКСПРЕСС

Fig. 8. Change in the equivalent doses to the thyroid gland of children with the distance from the NPP site according to the results of modeling using the RECASS-EXPRESS software package

Результаты прогнозирования эквивалентных доз облучения щитовидной железы детей и взрослых ниже установленного критерия аварийного реагирования (50 мЗв за первые 7 сут)<sup>1</sup> и не указывают на необходимость проведения йодного блокирования щитовидной железы у населения<sup>2</sup>.

Уменьшение общей эффективной дозы с расстоянием описывается с высокой степенью достоверности экспоненциальной зависимостью  $y = ae^{-bx}$ , коэффициент детерминации при этом составляет 0,9794 для J-RODOS и 0,9762 для RECASS-ЭКСПРЕСС.

Максимальное различие в полученных результатах наблюдается в ближней зоне АЭС: полученные значения общей эффективной дозы при моделировании J-RODOS в 2 раза выше, чем у RECASS-ЭКСПРЕСС на расстоянии 3 км от площадки (0,6 и 0,32 мЗв соответственно) и в 1,5 раза выше на расстоянии 5 км от площадки (0,3 и 0,21 мЗв соответственно). С увеличением расстояния от АЭС сходимость в полученных результатах оценки увеличивается, на расстоянии 10–50 км от площадки полученные значения общей эффективной дозы облучения, полученные с помощью RECASS-ЭКСПРЕСС, в 0,3–0,5 выше, чем у J-RODOS, и составляют от 0,01 до 0,1 мЗв (см. рис. 9).

<sup>1</sup> Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213.

<sup>2</sup> Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7 ; Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions 2013.

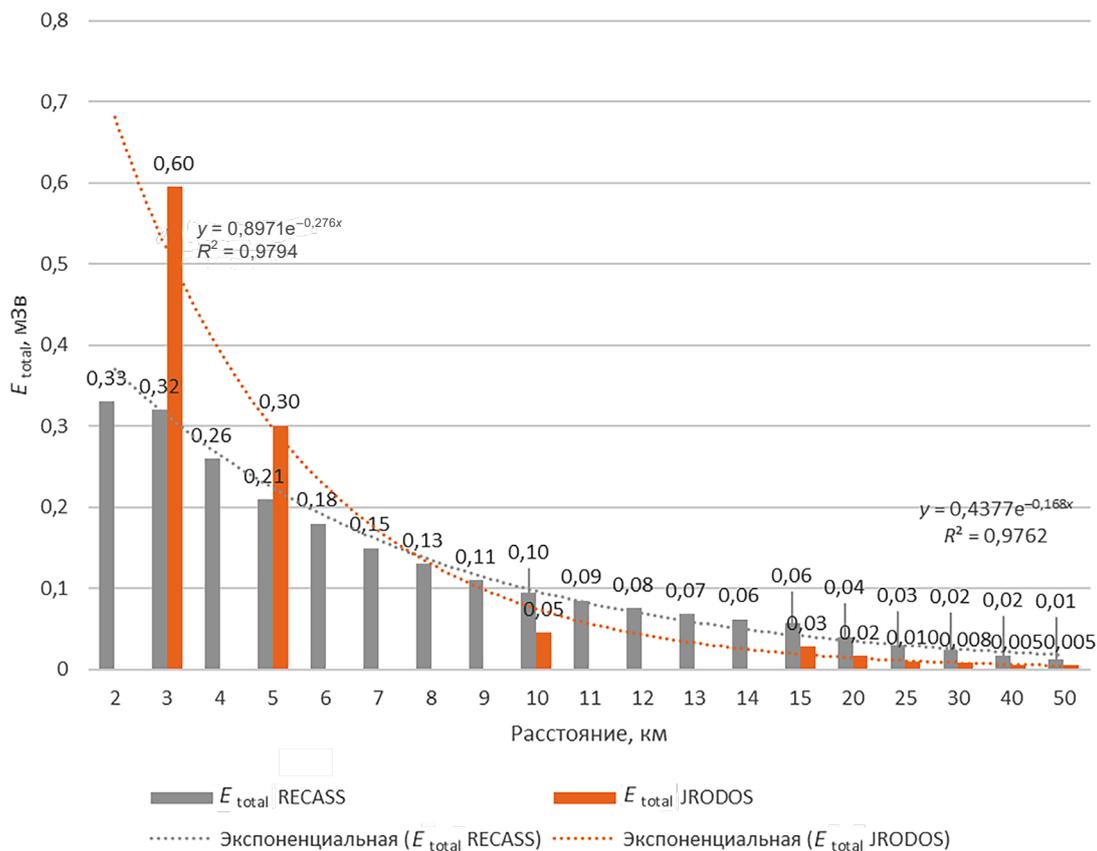


Рис. 9. Изменение общей эффективной дозы облучения взрослых с расстоянием от площадки АЭС по результатам моделирования с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС

Fig. 9. Change in the total effective dose to adults with distance from the NPP site according to the results of modeling using the J-RODOS and RECASS-EXPRESS software packages

Результаты прогнозирования общей эффективной дозы облучения населения ниже установленных международных и национальных критериев аварийного реагирования для проведения укрытия, эвакуации, дезактивации, ограничения потребления пищевых продуктов, молока и питьевой воды, контроля радиоактивного загрязнения – 100 мЗв за первые 7 сут<sup>1</sup>.

**Заключение.** При моделировании радиологических и радиационно-экологических последствий ТЗА на Белорусской АЭС с общим выбросом радионуклидов в окружающую среду  $2,15 \cdot 10^{15}$  Бк (в том числе  $3,60 \cdot 10^{13}$  Бк I-131 и  $6,90 \cdot 10^{12}$  Бк Cs-137) с помощью программных комплексов J-RODOS и RECASS-ЭКСПРЕСС выявлены следующие различия в полученных результатах:

разница в значении плотности выпадений радионуклидов I-131 и Cs-137 составляет 1 порядок величины, значения плотности выпадений I-131 совпадают лишь на расстоянии 3–5 км от источника от источника выброса;

разница в значении прогнозируемых значений эквивалентной дозы облучения щитовидной железы как детского, так и взрослого населения, полученных J-RODOS, в 3–4 раза выше, чем RECASS-ЭКСПРЕСС, на расстоянии 3–5 км от площадки; на расстоянии 10 км от площадки и более результаты, полученные обоими программными комплексами, практически равны;

полученные значения общей эффективной дозы при моделировании J-RODOS в 2 раза выше, чем у RECASS-ЭКСПРЕСС, на расстоянии 3 км от площадки и в 1,5 раза выше на расстоянии 5 км от площадки; с увеличением расстояния от АЭС сходимость в полученных результатах оценки увеличивается;

<sup>1</sup> Preparedness and Response for a Nuclear and Radiological Emergency. General Safety Requirements. Part 7 ; Критерии оценки радиационного воздействия: гигиен. норматив: утв. постановлением М-ва здравоохранения Респ. Беларусь 28 дек. 2012 г. № 213 ; Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor. EPR-NPP Public Protective Actions 2013.

ни один из полученных результатов прогнозирования не превышает установленных критериев аварийного реагирования и не указывает на необходимость проведения защитных мероприятий для населения.

Таким образом, RECASS-ЭКСПРЕСС завышает результаты прогнозирования плотности выпадений радионуклидов относительно J-RODOS, при этом различие в полученных дозах облучения невелико (при моделировании J-RODOS значения доз облучения выше вблизи от источника выброса).

J-RODOS имеет бóльшие относительно RECASS-ЭКСПРЕСС расчетные возможности (оценка последствий аварии на расстояния свыше 50 м от источника выброса, расчет содержания радионуклидов в продуктах питания и доз облучения от потребления пищевых продуктов, учет контрмер и доз облучения с применением контрмер и др.), однако из-за необходимости в привязке к данным онлайн период прогнозирования может быть существенно длиннее. Кроме того, прогнозирование на более дальние расстояния закономерно повышает неопределенность полученных результатов.

Различия в результатах моделирования последствий ТЗА на Белорусской АЭС могут объясняться различием в применяемых допущениях при проведении моделирования, заложенных в методы расчета значений концентрации радионуклидов в окружающей среде, а также в используемых коэффициентах при расчете доз облучения населения.

Основанные на моделях программные комплексы (J-RODOS, RECASS-ЭКСПРЕСС и др.) не должны применяться в качестве основы для определения начальных защитных и других мер реагирования во время аварийной ситуации. Тем не менее данные программные комплексы могут быть использованы специалистами, осуществляющими прогноз радиационной обстановки и оценку доз облучения населения на этапе готовности к реагированию на радиационную аварию на АЭС путем моделирования возможных аварийных сценариев для определения необходимости проведения мероприятий по защите населения, а также их масштабов (определение радиусов зон аварийного реагирования).

Модели и выполненные с их помощью прогнозы представляют интерес для установления областей в пределах зоны предупредительных мер или зоны планирования срочных защитных мер, которые должны быть эвакуированы в первую очередь, если эвакуация населения не может осуществляться одновременно во всех направлениях. Кроме того, при аварии на АЭС прогноз распространения выброса может быть полезным для определения приоритетных направлений работы групп мониторинга и для отбора проб.

### Список использованных источников

1. Turner, B. D. *Workbook on Atmospheric Dispersion Estimates* / B. D. Turner; U.S. Environmental Protection Agency. – North Carolina, 1970. – 84 p.
2. INTERRAS 1.2 : учеб. пособие. – Вена: МАГАТЭ, 2000. – 105 с.
3. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси (АСПА Россия–Беларусь) / редкол.: Ю. А. Израэль (предс., РФ), И. М. Богдевич (предс., Респ. Беларусь) [и др.]. – М. : Минск, 2009. – 140 с.
4. Чернобыль: радиоактивное загрязнение природных сред / Ю. А. Израэль [и др.]; под ред. Ю. А. Израэля. – Л.: Гидрометеиздат, 1990. – 296 с.

### References

1. Turner B. D. *Workbook on Atmospheric Dispersion Estimates*. North Carolina, U.S. EPA, 1970. 84 p.
2. *NTERRAS 1.2: tutorial*. Vienna, IAEA, 2000. 105 p.
3. Izrael' Yu., A., Bogdevich I. M. et al., eds. *Atlas of Modern and Predictive Aspects of the Consequences of the Accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant in the Affected Territories of Russia and Belarus (AMPA Russia–Belarus)*. Moscow, Minsk, 2009. 140 p. (in Russian).
4. Izrael' Yu. A., Vakulovskiy S. M., Vetrov V. A., Petrov V. N., Rovinskiy F. Ya., Stukin E. D.; Izrael' Yu. A., ed. *Chernobyl: Radioactive Contamination of Natural Environments*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1990. 296 p. (in Russian).

### Информация об авторах

*Кляус Виктория Вячеславовна* – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены» (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vkliaus@gmail.com

*Жукова Ольга Митрофановна* – кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности, Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены» (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: olga.zhukova.47@inbox.ru

*Николаенко Елена Владимировна* – кандидат медицинских наук, заведующий лабораторией радиационной безопасности, Республиканское унитарное предприятие «Научно-практический центр гигиены» (ул. Академическая, 8, 220012, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nikolaenko67@gmail.com

*Шайбак Алла Михайловна* – начальник отдела оперативных данных радиационного контроля и мониторинга чрезвычайных ситуаций, Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (пр. Независимости, 110, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sham@hmc.by

*Трусов Александр Владимирович* – начальник службы радиационного мониторинга, Республиканский центр по гидрометеорологии, контролю радиоактивного загрязнения и мониторингу окружающей среды (пр. Независимости, 110, 220114, Минск, Республика Беларусь). E-mail: tav@hmc.by

### Information about the authors

*Viktoryia V. Kliaus* – Ph. D. (Biology), Leading Researcher of the Radiation Safety Laboratory, Republican Unitary Enterprise “Scientific Practical Centre of Hygiene” (8, Akademicheskaya Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vkliaus@gmail.com

*Olga M. Zhukova* – Ph. D. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher of the Radiation Safety Laboratory, Republican Unitary Enterprise “Scientific Practical Centre of Hygiene” (8, Akademicheskaya Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: olga.zhukova.47@inbox.ru

*Alena U. Nikalayenka* – Ph. D. (Medicine), Head of the Radiation Safety Laboratory, Republican Unitary Enterprise “Scientific Practical Centre of Hygiene” (8, Akademicheskaya Str., 220012, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nikolaenko67@gmail.com

*Alla M. Shaibak* – Head of the Department of Operational Data of Radiation Control and Monitoring of Emergencies, Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sham@hmc.by

*Aliaksandr V. Trusau* – Head of the Radiation Monitoring Service, Republican Center for Hydrometeorology, Radioactive Contamination Control and Environmental Monitoring (110, Nezavisimosti Ave., 220114, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: tav@hmc.by