

ВЕСЦІ

НАЦЫЯНАЛЬнай

АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2024. Т. 69, № 2

ИЗВЕСТИЯ

НАЦИОНАЛЬНОЙ

АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2024. Т. 69, № 2

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

Выходит четыре раза в год

Учредитель – Национальная академия наук Беларуси

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

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

Главный редактор

Сергей Антонович Чижик –

Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

Редакционная коллегия

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

И. А. Старостина (ведущий редактор журнала)

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

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

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

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

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

- А. Ф. Ильюшенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь
- Б. Каталинич** – Центрально-Европейское отделение Международной инженерной академии, Вена, Австрийская Республика
- М. Консари** – Университет штата Луизиана, Батон-Руж, Соединенные Штаты Америки
- С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. Г. Кравцов** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. П. Ласковнѳв** – Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. М. Маляревич** – Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь
- В. П. Маркевич** – Институт фотоники Университета г. Манчестер, Манчестер, Великобритания
- Н. А. Махутов** – Институт машиноведения имени А. А. Благонравова Российской академии наук, Москва, Российская Федерация
- В. В. Митюшев** – Краковский политехнический университет им. Тадеуша Костюшко, Краков, Республика Польша
- Н. К. Мышкин** – Институт механики металлополимерных систем имени В. А. Белого Национальной академии наук Беларуси, Гомель, Республика Беларусь
- Нгуен-Ву Тронг** – Национальный институт прикладной механики и информатики Вьетнамской академии наук и технологий, Хошимин, Социалистическая Республика Вьетнам
- С. В. Панин** – Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, Томск, Российская Федерация
- О. Г. Пенязков** – Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Танович** – Белградский университет, Белград, Республика Сербия
- В. М. Федосюк** – Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению, Минск, Республика Беларусь
- М. Л. Хейфец** – Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Шуньин Цзи** – Совместный институт Даляньского политехнического университета и Белорусского государственного университета, Далянь, Китайская Народная Республика

Адрес редакции:
ул. Академическая, 1, к. 118, 220072, г. Минск, Республика Беларусь.
Тел.: + 375 17 374-02-45; e-mail: fvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2024. Т. 69, №2

Выходит на русском, белорусском и английском языках

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

Подписано в печать 12.06.2024. Выход в свет 27.06.2024. Формат 60 × 84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 74 экз. Заказ 114.
Цена номера: индивидуальная подписка – 13,34 руб., ведомственная подписка – 31,28 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий № 1/18 от 02.08.2013. ЛП №02330/455 от 30.12.2013. Ул. Ф. Скорины, 40, 220084, г. Минск, Республика Беларусь

© Оформление. РУП «Издательский дом «Беларуская навука»,
Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Серыя фізіка-тэхнічных навук, 2024

PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS

PHYSICAL-TECHNICAL SERIES, 2024, vol. 69, no. 2

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

Issued four times a year

Founder is the National Academy of Sciences of Belarus

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

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

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

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

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

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

Irina A. Starostsina (lead editor)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Alexander P. Laskovnev – Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Alexander M. Malyarevich – Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus
Vladimir P. Markevich – Photon Science Institute and School of Electrical and Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester, United Kingdom
Nikolay A. Makhutov – Mechanical Engineering Research Institute of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
Vladimir V. Mityushev – Cracow University of Technology, Krakow, Republic of Poland
Nikolai K. Myshkin – V. A. Belyi Metal-Polymer Research Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Gomel, Republic of Belarus
Nguyen-Vu Truong – National Institute of Applied Mechanics and Informatics, Vietnam Academy of Science and Technology, Ho Chi Minh City, Socialist Republic of Vietnam
Sergey V. Panin – Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation
Oleg G. Penyazkov – A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Lyubodrag Tanovich – University of Belgrade, Belgrade, Republic of Serbia
Valery M. Fedosyuk – Scientific and Practical Materials Research Center of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Mikhail L. Kheifetz – Institute of Applied Physics of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Republic of Belarus
Shunying Ji – Joint Institute of Dalian University of Technology and Belarusian State University, Dalian, People's Republic of China

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

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.
Physical-technical series, 2024, vol. 69, no. 2
Printed in Russian, Belarusian and English languages

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

It is sent of the press 12.06.2024. Appearance 27.06.2024. Format $60 \times 84 \frac{1}{8}$. Offset paper. The press digital.
Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 74 copies. Order 114.
Number price: individual subscription – 13,34 byn., departmental subscription – 31,28 byn.

Publisher and printing execution:
Republican unitary enterprise "Publishing House "Belaruskaya navuka"
Certificate on the state registration of the publisher, manufacturer, distributor of printing editions No. 1/18 dated August 2, 2013. License for the press No. 02330/455 dated December 30, 2013. Address: 40, F. Scorina Str., Minsk, 220084, Republic of Belarus.

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ

Рубаник В. В., Багрец Д. А., Рубаник В. В. (мл.), Урбан В. И. Структура и свойства поверхностного слоя TiNi-сплава, подвергнутого ионно-плазменной и ультразвуковой обработке *(на английском языке)* 95

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Щербакова В. Б., Гринчук П. С. Термодинамическое моделирование формирования карбида кремния в процессе Ачесона в нестехиометрических смесях 106

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Грабчиков С. С., Грабчикова Е. А., Драпезо А. П., Зубарь Т. И., Панасюк М. И., Канафьев О. Д., Лосев А. В., Труханов А. В., Федосюк В. М. Проблема защиты человека от воздействия низкочастотных электромагнитных полей в современном обществе. Возможные пути ее решения. 114

Дятко А. А., Костромицкий С. М., Шумский П. Н. Разработка и моделирование алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции 129

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Пискун Г. А., Алексеев В. Ф., Степченко О. В., Попов А. Н., Беликов А. Н., Рыбаков Д. Г. Оценка влияния длины и количества тепловых трубок на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от процессора 139

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Третинников Д. Л., Дойникова А. В., Нагула П. К. Анализ водородной взрывобезопасности АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при протекании тяжелой запроектной аварии 151

Бринкевич С. Д., Бринкевич Д. И., Киевицкая А. И., Кийко А. Н., Ковалёв И. А. Анализ накопления β -излучающих радионуклидов в процессе производства радиофармпрепаратов на основе ^{18}F с использованием циклотрона IBA CYCLONE 18/9 HC. 166

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

CONTENTS

MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

- Rubanik V. V., Bahrets D. A., Rubanik V. V. (jr.), Urban V. I.** Structure and properties of surface layer of TiNi alloy subjected to ion-plasma- and ultrasonic treatment 95

POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER

- Shcherbakova V. B., Grinchuk P. S.** Thermodynamic modeling of silicon carbide formation during the Acheson process in non-stoichiometric mixtures 106

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

- Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Drapezo A. P., Zubar T. I., Panasyuk M. I., Kanafyev O. D., Losev A. V., Trukhanov A. V., Fedosyuk V. M.** The problem of protecting a person from the effects of low-frequency electromagnetic fields in modern society. Possible ways to solve it 114
- Dyatko A. A., Kostromitsky S. M., Shumski P. N.** Development and modeling of algorithms for calculating target angle in the coordinate system of the onboard radar 129

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Piskun G. A., Alexeev V. F., Stsepchankou A. V., Popov A. N., Belikov A. N., Rybakov D. G.** Assessment of the influence of the length and number of heat pipes on the efficiency of the removal of excess thermal energy from the processor 139

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

- Tretinnikov D. L., Doinikova A. V., Nagula P. K.** Analysis of the hydrogen safety of the NPP with a VVER-1200/V-491 reactor in a severe beyond design based accident. 151
- Brinkevich S. D., Brinkevich D. I., Kiyavitskaya H. I., Kiyko A. N., Kovalev I. A.** Analysis of the accumulation of β -emitting radionuclides in the production of radiopharmaceuticals based on ^{18}F using the IBA CYCLONE 18/9 HC cyclotron 166

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-95-105>
UDC 621.793.14+621.9.048.6



Original article

Vasili V. Rubanik, Dzmitry A. Bahrets*, Vasili V. Rubanik (jr.), Vadzim I. Urban

*Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus,
13, General Lyudnikov Ave., 210009, Vitebsk, Republic of Belarus*

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF SURFACE LAYER OF TiNi ALLOY
SUBJECTED TO ION-PLASMA- AND ULTRASONIC TREATMENT**

Abstract. The paper presents the results of research on morphology, elemental composition, microhardness, corrosion properties of the surface layer of TiNi alloy subjected to ion-plasma (vacuum-arc method) deposition of TiN coating and ultrasonic treatment (UT) with different number of passes (n). The SEM method showed that ultrasonic treatment provides a significant reduction in the amount of the droplet phase on the TiN coating surface. The surface discontinuity of TiN coating at local points was observed with an increase in the number of passes during ultrasonic treatment. The effect of combined processing methods on the microhardness of TiNi sample was studied. It was shown that the synergistic effect can be observed for two hardening methods. The combined strengthening method increased the microhardness of TiNi alloy (1.6 GPa in the as-received state): due to the deposition of a TiN coating – up to 10.9 GPa, due to subsequently ultrasonic treatment – up to 14.5–18.4 GPa depending on the number of passes. For UT + TiN scheme, it was shown that the open circuit potential E_{corr} was about –250 mV which is practically independent of the number of passes and determined by the potential value of TiN coating. For TiN + UT scheme, it was found that with an increase in the number of passes, the value of E_{corr} shifts towards more negative values approaching the open circuit potential value of the TiNi sample in the as-received state (–350 mV). The analysis of Scanning Vibrating Electrode Technique (SVET) results showed high electrochemical compatibility of substrate (TiNi) and coating (TiN) materials in a chloride environment with minimal current density fluctuations for the samples subjected to UT + TiN and TiN + UT ($n = 1$). The proposed method for TiNi alloy treatment according to TiN + UT scheme ($n = 1$) promotes an improvement of surface morphology and corrosion resistance.

Keywords: TiNi, TiN coating, vacuum-arc deposition, ultrasonic treatment, microhardness, open circuit potential

Acknowledgements: this work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (project T21B-004).

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

Information about the authors: *Vasili V. Rubanik* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Laboratory of Physics of Metals at the Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-0350-1180>. E-mail: v.v.rubanik@tut.by; *Dzmitry A. Bahrets** – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Scientific Secretary of the Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0009-0009-2632-5464>. E-mail: bagurets@gmail.com; *Vasili V. Rubanik (jr.)* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at the Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-9268-0167>. E-mail: ita@vitebsk.by; *Vadzim I. Urban* – Junior Researcher at the Institute of Technical Acoustics of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vadik.urban1995@mail.ru

Contribution of the authors: *Vasili V. Rubanik* – research planning, generalization of the research results, formulation of conclusions; *Dzmitry A. Bahrets* – analysis and generalization of literature data, investigation of the structure and properties of the obtained samples, comparative analysis of the experimental data, writing and formatting the text of the manuscript; *Vasili V. Rubanik (jr.)* – development of research methodology, editing the text of the manuscript; *Vadzim I. Urban* – ion-plasma- and ultrasonic treatment of TiNi-samples, working with graphic materials.

For citation: Rubanik V. V., Bahrets D. A., Rubanik V. V. (jr.), Urban V. I. Structure and properties of surface layer of TiNi alloy subjected to ion-plasma- and ultrasonic treatment. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 95–105. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-95-105>

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Received: 04.03.2024

Modified: 30.05.2024

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Оригинальная статья

В. В. Рубаник, Д. А. Багрец*, В. В. Рубаник (мл.), В. И. Урбан

*Институт технической акустики Национальной академии наук Беларуси,
пр. Генерала Лядникова, 13, 210009, Витебск, Республика Беларусь*

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ TiNi-СПЛАВА, ПОДВЕРГНУТОГО ИОННО-ПЛАЗМЕННОЙ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ОБРАБОТКЕ

Аннотация. Проведено исследование морфологии, элементного состава, микротвердости и коррозионных свойств поверхностного слоя сплава TiNi после комбинированной обработки, которая включала ионно-плазменное (вакуумно-дуговым методом) осаждение TiN-покрытия и ультразвуковую обработку (УЗО) с различным количеством проходов (n). С использованием сканирующей электронной микроскопии установлено, что ультразвуковая обработка способствует существенному снижению количества капельной фазы на поверхности TiN-покрытия, однако с увеличением числа проходов при УЗО наблюдается нарушение сплошности TiN-покрытия в локальных точках. Исследовано влияние комбинированной обработки образцов TiNi на микротвердость и выявлен синергетический эффект двух упрочняющих технологий, который заключается в увеличении микротвердости сплава TiNi (1,6 ГПа в режиме поставки): за счет осаждения TiN-покрытия – до 10,9 ГПа, за счет последующей УЗО – от 14,5 до 18,4 ГПа в зависимости от количества проходов. Установлено, что для схемы УЗО + TiN величина потенциала коррозии E_{corr} практически не зависит от числа проходов, составляет порядка -250 мВ и определяется величиной потенциала TiN-покрытия. Для схемы TiN + УЗО выявлено, что с увеличением числа проходов величина E_{corr} смещается в сторону более отрицательных значений, приближаясь к значению потенциала коррозии TiNi в состоянии поставки (-350 мВ). С использованием метода сканирующего вибрирующего зонда (SVET) для образцов, подвергнутых обработке УЗО + TiN и TiN + УЗО ($n = 1$), выявлена высокая электрохимическая совместимость материалов основы (TiNi) и покрытия (TiN) в хлоридной среде с минимальными флуктуациями плотности тока. На основании полученных экспериментальных данных предложен технологический процесс обработки сплава TiNi по схеме TiN + УЗО ($n = 1$), позволяющий достичь синергетического эффекта упрочнения поверхностного слоя сплава TiNi в сочетании с высокими коррозионными свойствами и улучшенной морфологией поверхности.

Ключевые слова: TiNi, TiN-покрытие, вакуумно-дуговое осаждение, ультразвуковая обработка, микротвердость, потенциал коррозии

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (проект T21B-004).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Рубаник Василий Васильевич – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией физики металлов Института технической акустики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-0350-1180>. E-mail: v.v.rubanik@tut.by; Багрец Дмитрий Александрович* – кандидат технических наук, доцент, ученый секретарь Института технической акустики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0009-2632-5464>. E-mail: bagurets@gmail.com; Рубаник Василий Васильевич (мл.) – доктор технических наук, профессор, директор Института технической акустики Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-9268-0167>. E-mail: ita@vitebsk.by; Урбан Вадим Иванович – младший научный сотрудник Института технической акустики Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vadik.urban1995@mail.ru

Вклад авторов: Рубаник Василий Васильевич – планирование исследований, обобщение результатов, формулировка выводов; Багрец Дмитрий Александрович – анализ и обобщение данных литературы, проведение исследований структуры и свойств полученных образцов, сравнительный анализ экспериментальных данных, написание и оформление текста рукописи; Рубаник Василий Васильевич (мл.) – разработка методологии исследования, редактирование текста рукописи; Урбан Вадим Иванович – ионно-плазменная и ультразвуковая обработка образцов TiNi, работа с графическим материалом.

Для цитирования: Структура и свойства поверхностного слоя TiNi-сплава, подвергнутого ионно-плазменной и ультразвуковой обработке (на англ. яз.) / В. В. Рубаник [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69 № 2. – С. 95–105. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-95-105>

Поступила в редакцию: 04.03.2024

Доработанный вариант: 30.05.2024

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Introduction. Ion-plasma coating deposition methods have been widely used for production of barrier layers and functional coatings, particularly titanium nitride (TiN). Although TiN coatings have been shown to have positive effects on hardness, wear resistance, corrosion resistance, and friction reduction, their biomechanical compatibility sometimes makes them less effective in medicine [1, 2].

Having high fragility, they do not always provide sufficient adhesion strength to substrate, particularly, in dynamic conditions. The coating integrity violation can cause the release of potentially toxic elements of a substrate material (Ni, V, Al, Co, etc.) into a biological environment with their subsequent accumulation in human tissues. For TiN coatings used in medicine, mechanical properties should be considered. These properties must be maximally consistent with a metal substrate reducing anisotropy of product's properties over its thickness.

The attempts have been made to produce coatings with high hardness, fatigue wear and crack resistance [3]. That applies to multilayer and composite coatings that combine hard and soft layers.

A promising method for balancing mechanical properties of a coating and a substrate is high-energy treatment of a product surface for hardening before deposition process [4–7] or high-energy treatment of a coating deposited on a product surface for stress relaxation and softening [8, 9].

A very wide range of effects associated with the influence of ultrasound on materials is known [4]: structural changes, reduction of internal stresses in deformed metals, increase of plastic properties (acoustoplastic effect), etc. Depending on frequency, amplitude, and locality, it is possible to achieve both strengthening, softening and plasticity enhancement of a material over time. This opens up opportunities for ultrasonic treatment (UT) to be used not only as an independent operation for hardening surface of metals and alloys, but also as one of operations of combined processing to prepare surfaces for coating or improve performance properties of previously formed coatings [10–12].

The aim of the present paper was to study the structure and properties of the surface layer of a medical TiNi alloy subjected to ion plasma (deposition of TiN coating) and ultrasonic treatment.

Experimental. The flat wire samples of Ti – 55.16 wt.% Ni alloy (further named TiNi) with cross-section dimensions of 0.3×8 mm were used for the study. The combined treatment of the samples was carried out according to two schemes:

- 1) TiN coating with a thickness of ~ 1 μm followed by ultrasonic treatment (TiN + UT);
- 2) ultrasonic surface treatment followed by coating (UT + TiN).

The TiN coatings were obtained in the Bulat-6 vacuum arc installation. We used a deposition mode based on the calculation of the substrate temperature during ion plasma treatment [13]:

- Ti-ion bombardment at $U = -800$ V, $I = 100$ A for 20 minutes (this treatment provides a substrate temperature of 700 °C which corresponds to recrystallization of TiNi);
- the deposition of Ti sublayer at $U = -100$ V, $I = 100$ A for 2 minutes (the sublayer provides a higher adhesion of TiN coating to the substrate);
- the deposition of TiN coating at $U = -100$ V, $I = 100$ A, $P_{N_2} = 4 \cdot 10^{-1}$ Pa for 15 minutes.

Ultrasonic treatment was carried out using an experimental installation for ultrasonic hardening and finishing of flat workpieces developed by the authors [14], according to regimes represented in the Table.

Ultrasonic treatment regimens of TiNi samples

Parameters	Designation	Unit	Value
Frequency	f_r	kHz	19.5
Amplitude	A	μm	15
Speed of sample movement relative to the tool	V	mm/s	6.25
Number of tool passes	n	–	1÷6
Static force	F_s	N	40

The surface morphology was studied by scanning electron microscopy (SEM) using a Tescan Mira microscope (Czech Republic). The qualitative and quantitative elemental analysis of the sample surface was identified by X-ray spectral analyzer by Oxford Instruments Analytical Ltd (UK).

The microhardness of the TiNi samples after combined treatment was measured using a PMT-3M device. The Vickers and Knoop indenters were used with 20 g and 2 g loads, respectively.

Two methods were used to evaluate the corrosion properties of TiNi alloy with TiN coatings: the measurement of the open circuit potential E_{corr} and Scanning Vibrating Electrode Technique (SVET). The tests were carried out in 0.9 % NaCl solution (a universal model medium for conducting corrosion tests for medical devices) at room temperature for 15 hours.

Results and discussion. Morphology and elemental composition. The presence of a droplet phase is a significant disadvantage of vacuum-arc method [15]: its presence on a coating surface leads to an increase in roughness, in friction coefficient and, hence, a decrease in wear resistance. In addition, as the droplet phase content increases, the number of macrodefects in the coating increases. Heterogeneity of physical properties in the volume and on the coating surface increases due to differences in chemical composition of the droplets and the coating. The droplet phase in the form of predominantly spherical particles of different diameters can be observed in the SEM image of the TiN coating surface (Figure 1).

This type of surface defect was found for the TiNi samples treated according to UT + TiN scheme (Figure 2), i.e. when the final operation was to apply a nitride titanium coating. A large variation in droplet sizes can be observed: from submicron to $\sim 20 \mu\text{m}$. However, most of them were about 1 to 5 μm in diameter.

Figure 3 shows the surface of the TiNi sample with a TiN coating with a uniform Ti + N composition. However, there were also defects with different elemental compositions: a droplet phase (mainly Ti), as well as porosity with a high content of the substrate element – Ni.

Similarly, the element distribution maps were obtained for the TiNi samples after combined treatment according to different schemes and with different number of passes during ultrasonic treatment. For UT + TiN scheme, the observed picture was almost similar to the case considered in Figure 3. A different picture was for TiN + UT scheme (Figure 4). No droplet defects were found which can be explained by the intense plastic deformation of the surface layers leading to the introduction of such defects into the coating thickness. The observed elongated areas with the high content of nickel detected can be due to cracking of TiN coating. The similar picture was observed on the surface of TiN + UT samples ($n = 3$ and $n = 6$).

The presence of nickel (toxic and carcinogenic metal [16–19]) is the main factor limiting TiNi for a broad use for medical application. In this study, we focus on the quantitative elemental analysis of nickel. Significant differences in the dynamics of change and absolute values of nickel concentration were found for two treatment schemes (Figure 5):

for UT + TiN scheme, a decrease in C_{Ni} value from 8.9 wt.% ($n = 1$) to 2.8 wt.% ($n = 6$) was observed;

for TiN + UT scheme, the value of C_{Ni} was no less than 10.2 wt.% ($n = 1$), and for $n = 3$ was 26.3 wt.%.

This confirms the earlier finding regarding the integrity of TiN coatings being damaged during ultrasonic treatment with a number of passes ≥ 3 .

Microhardness. One of the expected results of this study was to achieve a synergistic effect via the application of two different surface engineering methods – ultrasonic strengthening treatment and hard TiN coating ($HV \geq 17 \text{ GPa}$ [20]) deposition.

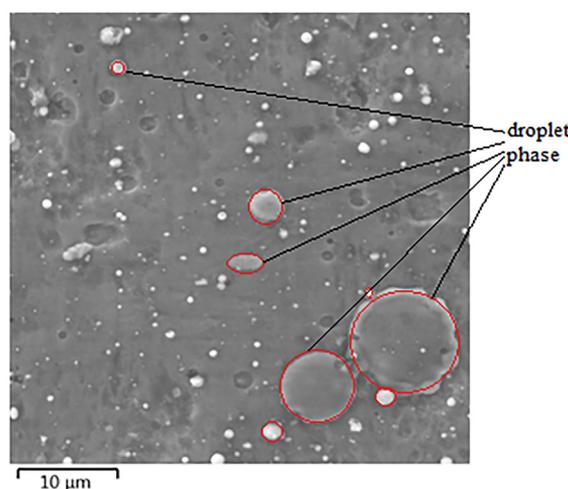


Figure 1. SEM image of TiNi surface sample with TiN coating

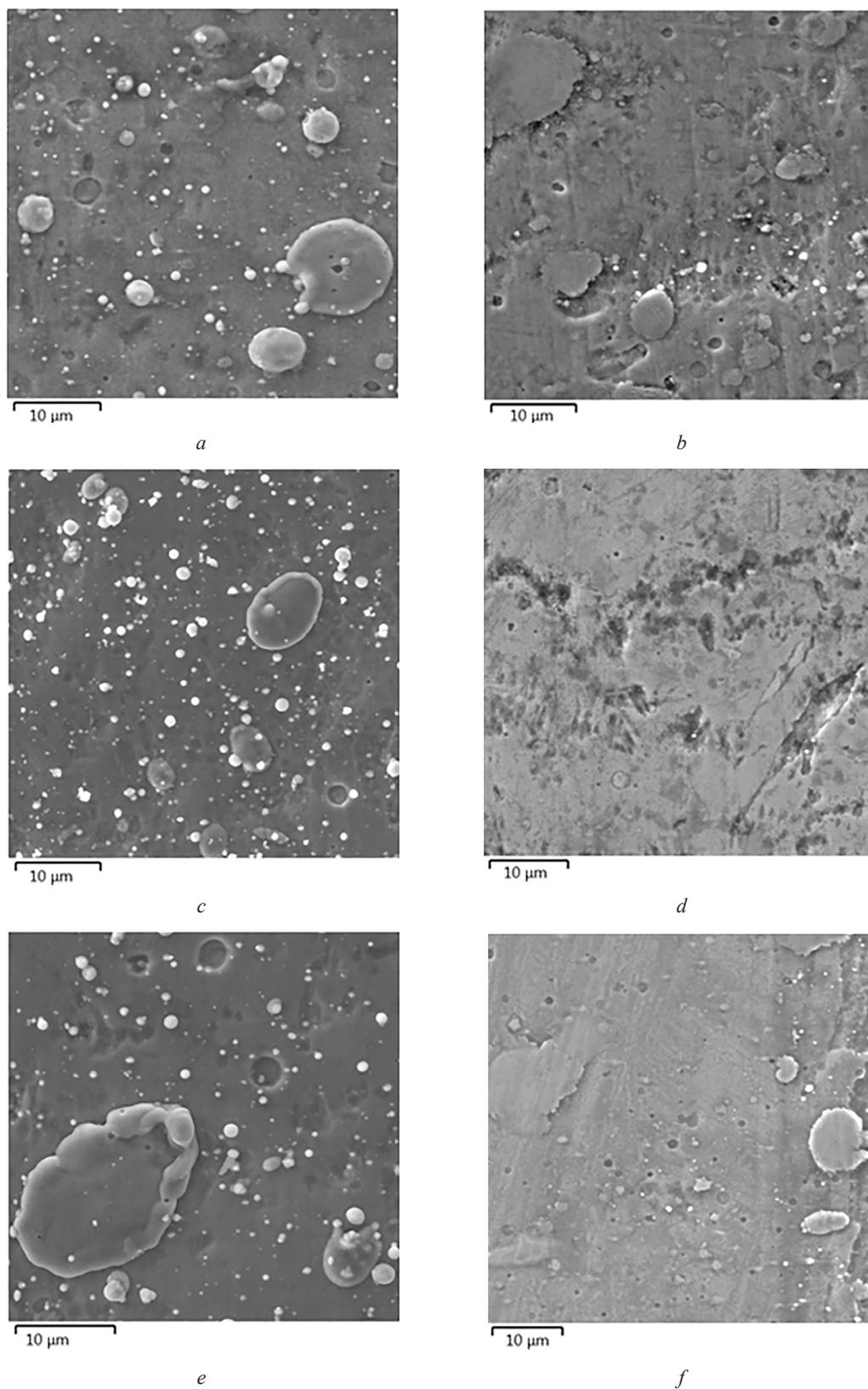


Figure 2. SEM images of the surface of TiNi samples after combined treatment:
a, c, e – UT + TiN; *b, d, f* – TiN + UT; *a, b* – *n* = 1, *c, d* – *n* = 3; *e, f* – *n* = 6

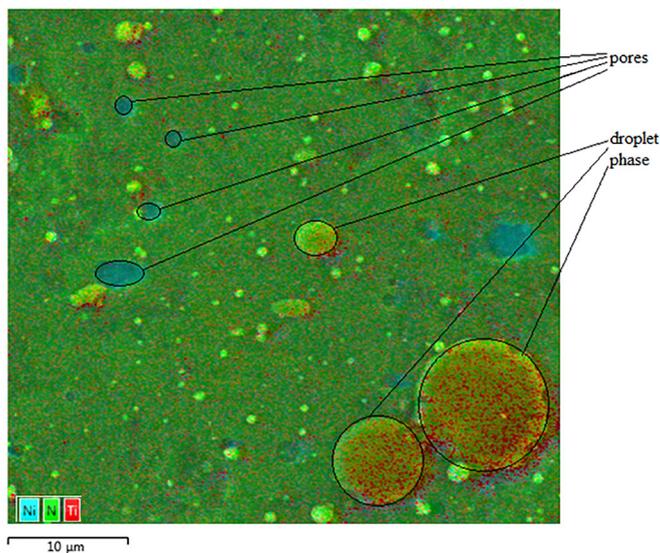


Figure 3. Surface image of TiNi sample coated with TiN in characteristic X-ray in overlay of colour fields of the substrate and coating elements

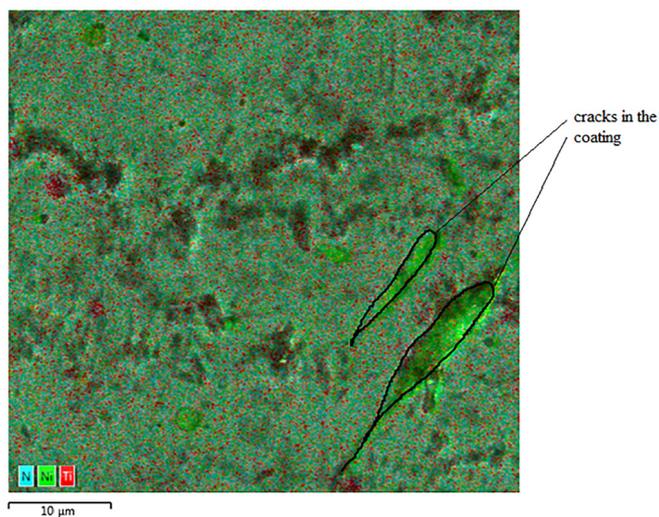


Figure 4. Surface image of TiNi sample subjected to TiN + UT ($n = 3$) in characteristic X-ray in overlay of colour fields of the substrate and coating elements

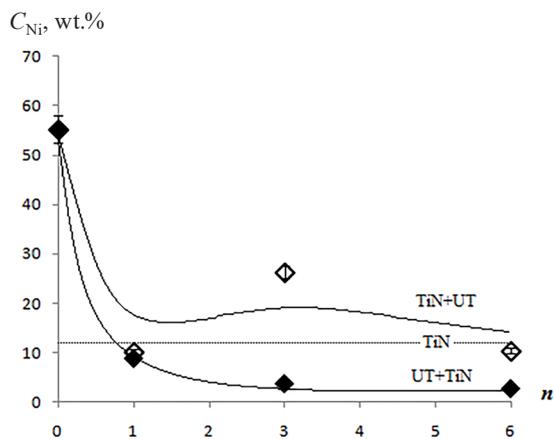


Figure 5. Change in Ni concentration on the surface of TiNi sample after combined treatment depending on the number of UT passes

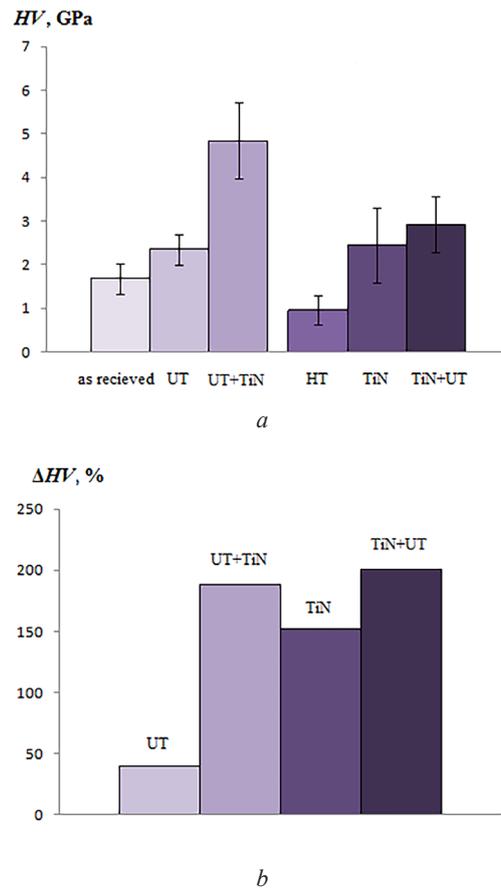


Figure 6. Vickers microhardness of TiNi samples in the as-received state after heat treatment (HT), ultrasonic surface treatment, deposition of TiN coating and their combination (a); increase in Vickers microhardness depending on the type of surface treatment (b)

In fact, ultrasonic treatment ($n = 1$) of the TiNi sample in the as-received state led to an increase in its microhardness from ~ 1.7 to ~ 2.4 GPa (Figure 6, a), and subsequent deposition of TiN to ~ 4.9 GPa.

The total increase in microhardness ΔHV calculated by formula (1) after treatment according to UT + TiN scheme was $\sim 190\%$ (Figure 6, b).

$$\Delta HV = (HV_i - HV_0) / HV_0 \cdot 100 \%, \quad (1)$$

where HV_i – microhardness of TiNi samples after treatment according to different schemes, HV_0 – microhardness of TiNi in the as-received state.

Analyzing the treatment contribution to the rise in microhardness value using TiN + UT scheme reveals that when TiN coating is applied to the sample in its as-received state, a change in the structure of TiNi occurs that is comparable to heat treatment process. Its value was compared with the microhardness of the sample after heat treatment at $700\text{ }^\circ\text{C}$ for 20 minutes (Figure 6, a). It was ~ 1 GPa, i.e. it was significantly less than for the sample in the as-received state. Due to differences in TiNi microhardness before combined treatment, for TiN + UT scheme ($n = 1$) the microhardness values of ~ 2.9 GPa were obtained, different from UT + TiN scheme, the total increase ($\sim 200\%$) was comparable (see Figure 6, b).

The obtained microhardness values were significantly lower than the hardness of traditional hardening TiN coatings due to small thickness of the coating and impossibility of meeting the condition $H \leq 10h$ [21], where H is the indentation depth, μm ; h – coating thickness, μm . This indicates that a softer substrate has a major influence on measurement findings, and that can be avoided with much smaller loads.

The measurement was carried out using the Knoop hardness testing with applied load of 2 g when analyzing the influence of number of passes of ultrasonic treatment on the microhardness value of TiNi samples (Figure 7).

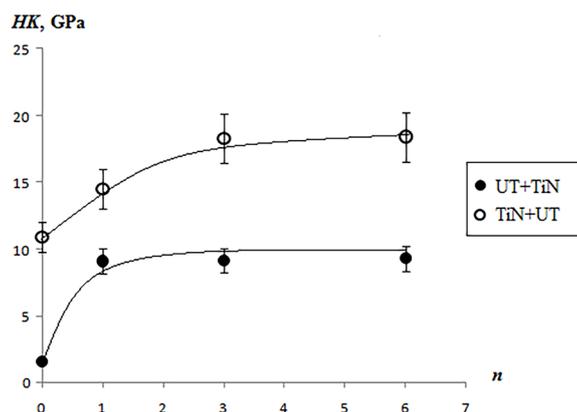


Figure 7. Dependence of the Knoop microhardness of TiNi samples on the number of UT passes after combined treatment

Based on the obtained dependencies, the following conclusions were made:

– for the samples treated according to UT + TiN scheme, the Knoop microhardness was practically the same for different n (9.1÷9.3 GPa) and was close to the microhardness value of TiN (10.9 GPa) which can be explained by relaxation of residual stresses arising during ultrasonic treatment due to high-temperature exposure upon deposition;

– for the samples treated according to TiN + UT scheme, the synergistic effect of two strengthening technologies was observed: the microhardness value of TiNi sample (1.6 GPa) first increases to 10.9 GPa due to deposition of TiN, and subsequent ultrasonic treatment promotes its even greater growth – up to 14.5 GPa at $n = 1$ and 18.3 GPa at $n = 3$. With a further increase in the number of passes, the microhardness value remains at the same level – 18.4 GPa ($n = 6$).

Corrosion properties. Figure 8 shows the measured values of the TiNi samples open circuit potential E_{corr} following different treatments. The value of E_{corr} for TiNi shifted to the area of more positive values after treatment in comparison with in the as-received state, where $E_{\text{corr}} = -350$ mV. Following the application of TiN + UT ($n = 1$), the sample shift ($\Delta E_{\text{corr}} = 140$ mV) was found.

The study of the dependence of the E_{corr} value on the number of UT passes for UT + TiN scheme (Figure 9) showed that it was practically independent of n (-250 mV). For TiN + UT scheme with $n = 1$, the E_{corr} value was ≈ -220 mV (see Figure 8). The value of E_{corr} shifted towards more negative values as the number of passes increased, approaching the value of the open circuit potential of the TiNi sample in the as-received state.

SVET is used to study electrochemical activity of the material at the micro level. The tests were carried out according to [22]. The current density distribution on the surface of the TiNi samples (Figure 10) shows significant inhomogeneity only for the TiN + UT sample ($n = 3$), which, as mentioned above, results from the destruction of the integrity of TiN coating at local points.

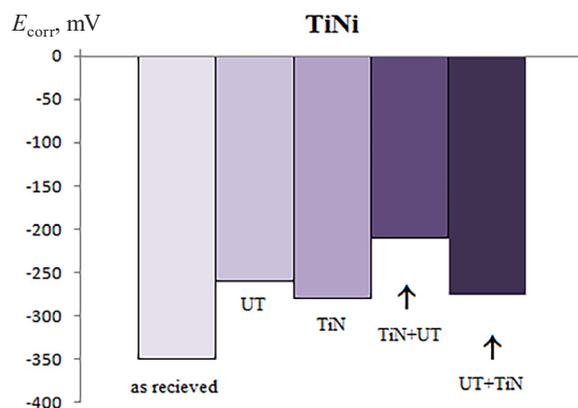


Figure 8. Open circuit potentials of TiNi samples after UT ($n = 1$), TiN coating deposition and their combinations

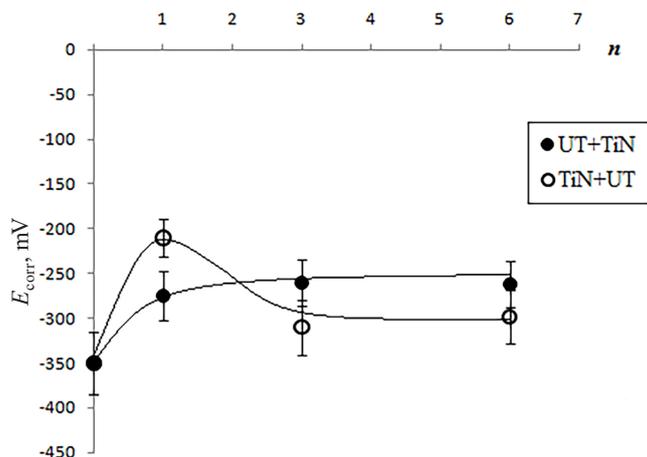


Figure 9. Dependence of the E_{corr} value of TiNi samples on the number of UT passes after combined treatment

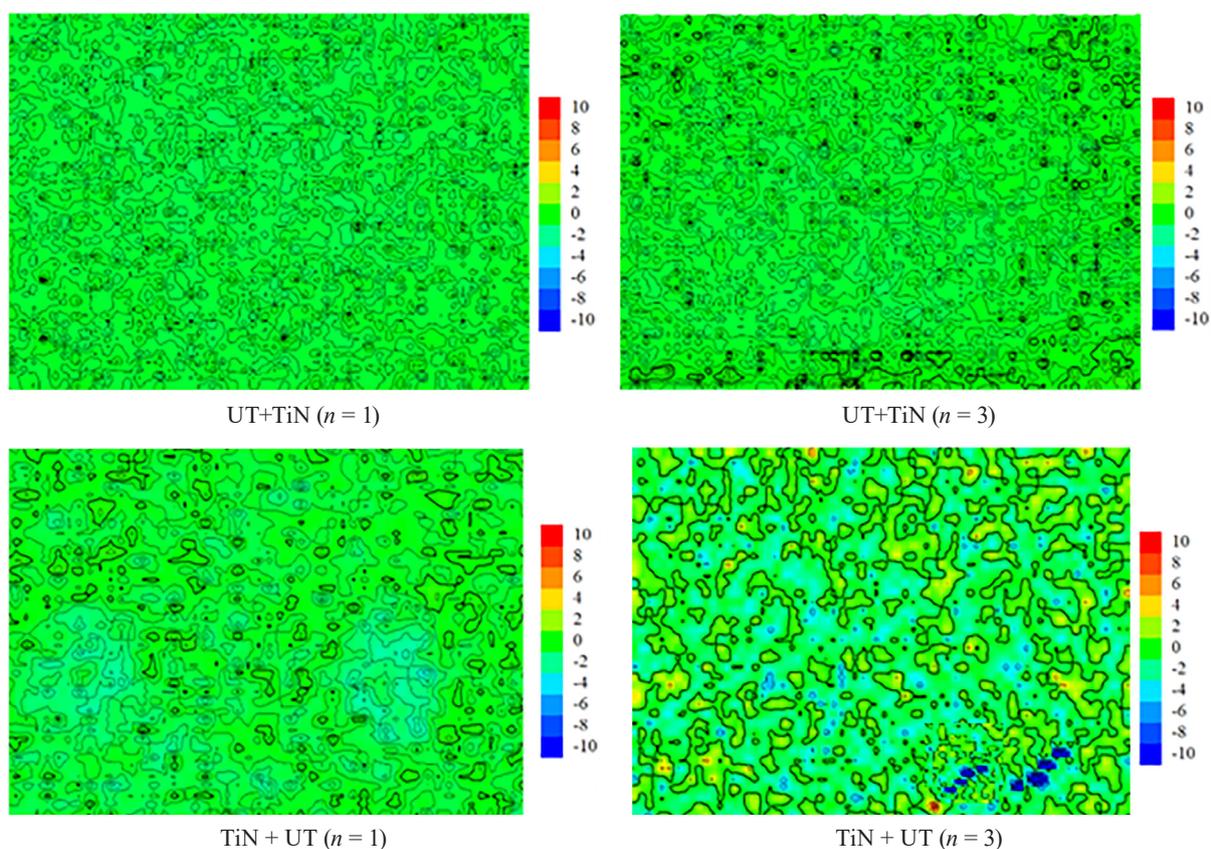


Figure 10. Current density distribution ($\mu\text{A} / \text{mm}^2$) on the surface of TiNi samples after exposure to 0.9% NaCl solution

The defective areas had more electronegative potential compared to the rest of the study surface. The samples of UT + TiN and TiN + UT ($n = 1$) demonstrated high electrochemical compatibility of the substrate and the coating material in a chloride media with minimal fluctuations in current density.

Conclusions. The surface morphology and the distribution of elements in the surface layer of the TiNi samples after combined treatment according to UT + TiN and TiN + UT schemes were studied. The macroparticles of the droplet phase with an average diameter of 1 to 5 μm were found. The subsequent ultrasonic treatment has been shown to significantly reduce the amount of the droplet phase. With an increase in n , cracking is observed on the surface of the TiN coating. The quantitative analysis of nickel content showed that the value of C_{Ni} varied from 8.9 wt.% ($n = 1$) to 2.8 wt.% ($n = 6$) for UT + TiN scheme; it was not less than 10.2 wt.% for TiN + UT scheme.

The effect of combined treatment of the TiNi samples on the Knoop microhardness was studied. The synergistic effect of two strengthening methods (TiN + UT) was found. The microhardness of TiNi was increased (1.6 GPa in the as-received state): due to deposition of TiN coating – up to 10.9 GPa, due to subsequent ultrasonic treatment – up to 14.5 GPa ($n = 1$), 18.3 GPa ($n = 3$) and 18.4 GPa ($n = 6$).

The corrosion studies of TiNi after combined treatment showed that for UT + TiN scheme the value of E_{corr} was practically independent on the number of passes n and was about of -250 mV and determined by the potential of TiN-coating. For TiN+UT scheme, it was found that with an increase in the number of passes, the value of E_{corr} shifted towards more negative values, approaching the value of the open circuit potential of the TiNi sample in the as-received state (-350 mV). High electrochemical compatibility of the substrate and the coating material in a chloride media with minimal current density fluctuations was revealed for the samples subjected to UT + TiN and TiN + UT ($n = 1$).

A method for treatment TiNi according to TiN + UT scheme is proposed including:

– deposition of TiN coating with a thickness of ~ 1 μm using the vacuum-arc deposition method at arc current of 100 A, a bias potential from -800 V (annealing at ~ 700 $^{\circ}\text{C}$) to -100 V (deposition of Ti-sublayer and TiN coating) and nitrogen pressure ~ 0.4 Pa;

– ultrasonic treatment at frequency ~ 19.5 kHz, amplitude ~ 15 μm , number of tool passes $n = 1$.

This treatment achieves the synergistic effect of strengthening the TiNi surface layer showing improvement of surface morphology and corrosion resistance and can find application in technological processes for fabrication of biomedical devices from shape memory alloys.

References

1. Kwok D. T. K., Schulz M., Hu T., Chu C., Chu P. K. Surface Treatments of Nearly Equiatomic NiTi Alloy (Nitinol) for Surgical Implants. *Biomedical Engineering. Trends in Materials Science*. InTech, 2011, ch. 12, pp. 269–282. <https://doi.org/10.5772/13212>
2. Bagrets D. A., Rubanik V. V., Rubanik V. V. Jr., Bobrov V. P. Microhardness of TiN-TiNi composite produced by ion-plasma deposition. *Steel in Translation*, 2014, vol. 44, no. 4, pp. 268–271. <https://doi.org/10.3103/S0967091214040159>
3. Malagin G. A. Plasticity and strength of micro- and nanocrystalline materials. *Physics of the Solid State*, 2007, vol. 49, pp. 1013–1033. <https://doi.org/10.1134/S1063783407060017>
4. Artemiev V. V., Klubovich V. V., Rubanik V. V. *Ultrasound and Material Processing*. Minsk, Ekoperspektiva Publ., 2003. 334 p. (in Russian).
5. Karatas C., Yilbas B. S., Aleem A., Ahsan M. Laser treatment of cemented carbide cutting tool. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 183, pp. 234–240. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.10.012>
6. Uglov V. V., Cherenda N. N., Anishchik V. M., Stalmashonak A. K., Astashinski V. M., Mishchuk A. A. Formation of alloying layers in a carbon steel by compression plasma flows. *Vacuum*, 2007, vol. 81, pp. 1341–1344. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2007.01.041>
7. Auchinnikau E., Chekan N., Akula I., Eisymont E. Hybride method for hardening of super hard vacuum coatings. *Proceeding of the 5th International Conference on Material Science*. Varna, 2019, pp. 60–62.
8. Bagrets D. A., Klubovich V. V., Rubanik V. V. The effect of annealing conditions on the adhesive properties of TiN coatings. *Journal of Friction and Wear*, 2012, vol. 33, pp. 371–373. <https://doi.org/10.3103/S1068366612050066>
9. Bahrets D. A., Rubanik V. V., Savitsky V. O., Urban V. I. Structural and performance characteristics of titanium nitride coatings for medical use after annealing in air. *Bulletin of Vitebsk State Technological University*, 2018, no. 2 (35), pp. 37–44 (in Russian). <https://doi.org/10.24411/2079-7958-2018-13504>
10. Klimentov V. A., Kovalevskaya Zh. G., Agafonova N. S., Tolmachev A. I., Zaitsev K. V., Ivanov Yu. F. Ultrasonic modification – a method of surface preparation before thermal spraying. *Tekhnologii remonta, vosstanovleniya i uprochneniya detalei mashin, mekhanizmov, oborudovaniya, instrumenta i tekhnologicheskoi osnastki: Materialy 8-i mezhdunarodnoi prakticheskoi konferentsii-vystavki* [Technology of repair, restoration and hardening of machine parts, mechanisms, equipment, tools and technological equipment: Processing of the 8th International Practical Conferences-Exhibitions]. St. Petersburg, 2006, pp. 150–158 (in Russian).
11. Sbitnev A. G. *Improving the Wear Resistance of Parts Made of Titanium Alloys Based on the Combined Use of Polyion Implantation and Ultrasonic treatment* [dissertation]. Moscow, 2020. 167 p. (in Russian).
12. Kovalevskaya Zh. G. *Structure and Properties of Surface Layers and Coatings During Modifying Ultrasonic Treatment* [dissertation]. Tomsk, 2018. 334 p. (in Russian)
13. Rubanik V. V., Bahrets D. A., Rubanik V. V. jr., Urban V. I., Uzhekina A. N., Dorodeiko V. G. Setting the functional properties of TiNi alloys during ion-plasma coating deposition process. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2021, vol. 65, no. 1, pp. 119–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2021-65-1-119-128>
14. Rubanik V. V., Lutsko V. F., Bahrets D. A., Labetsky V. S., Krugleshov A. A., Shakurov I. A. Equipment for ultrasonic surface treatment of titanium alloys. *Aktual'nye problemy prochnosti: materialy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii* [Actual Problems of Strength: Materials of the International Scientific Conference]. Minsk, 2022, pp. 394–395 (in Russian).

15. Karpov D. A. Cathodic arc sources and macroparticle filtering. *Surface and Coatings Technology*, 1997, vol. 96, iss. 1, pp. 22–33. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(98\)80008-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(98)80008-X)
16. Kasprzak K. S., Bialkowski K. Inhibition of antimutagenic enzymes, 8-oxo-dGTPases, by carcinogenic metals. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 2000, vol. 79, pp. 231–236. [https://doi.org/10.1016/s0162-0134\(99\)00240-8](https://doi.org/10.1016/s0162-0134(99)00240-8)
17. Al-Waheidi E. M. *Allergic Reaction to Nickel Orthodontic Wire: a Case Report*. Quintessence Int., 1995, vol. 26, pp. 385–387.
18. Bass J. K., Fine H., Cisneros G. J. Nickel hypersensitivity in the orthodontic patient. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, 1993, vol. 103, iss. 3, pp. 280–285. [https://doi.org/10.1016/0889-5406\(93\)70009-D](https://doi.org/10.1016/0889-5406(93)70009-D)
19. Takamura K., Hayashi K., Ishinishi N., Yamada T., Sugioka Y. Evaluation of carcinogenicity and chronic toxicity associated with orthopedic implants in mice. *Journal of Biomedical Materials Research*, 1994, vol. 28, pp. 583–589. <https://doi.org/10.1002/jbm.820280508>
20. Andreev A. A., Sablev L. P., Grigoriev S. N. *Vacuum Arc Coatings*. Kharkov, 2010. 318 p. (in Russian).
21. Kharitonov L. G. *Determination of Microhardness*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1967. 47 p. (in Russian).
22. Bastos A. *Application of SVET/SIET Techniques to Study Healing Processes in Coated Metal Substrates*. Springer International Publishing AG, 2017. 57 p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-19454-7_138-2

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-106-113>
УДК 544.323.2Обзор**В. Б. Щербакова*, П. С. Гринчук***Институт тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, 220072, Минск, Республика Беларусь***ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ФОРМИРОВАНИЯ КАРБИДА КРЕМНИЯ
В ПРОЦЕССЕ АЧЕСОНА В НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКИХ СМЕСЯХ**

Аннотация. Представлен краткий обзор и критическая оценка литературных данных, касающихся механизма карботермического восстановления оксида кремния. Для разрешения разночтений в данных о количестве химических реакций и ключевых промежуточных веществах в процессе Ачесона в работах различных авторов было проведено термодинамическое моделирование состава продуктов карботермического восстановления оксида кремния (IV) при общем давлении 1 бар. Определено, что среди промежуточных веществ отсутствуют CO_2 и Si при температурах, близких к температуре образования карбида кремния (от 1520 до ~ 2500 °C). Из нескольких десятков возможных реакций были выделены две доминирующие реакции, приводящие к образованию карбида кремния. Обнаружено влияние температуры реагентов в диапазоне от 1000 до 3000 °C, их локального окружения и отклонения от стехиометрии исходной смеси на состав продуктов реакции. Установлена существенная асимметрия при небольших отклонениях состава шихты от стехиометрии: локальный избыток оксида кремния (IV) на уровне нескольких массовых процентов приводит к увеличению потерь SiC в 10–16 раз больше, чем аналогичный по величине локальный избыток углерода. Полученные новые данные объясняют некоторые эмпирические наблюдения и упрощают физико-химическое моделирование процесса Ачесона.

Ключевые слова: термодинамическое моделирование, процесс Ачесона, карбид кремния, минимизация энергии Гиббса, карботермическое восстановление

Благодарности: авторы выражают благодарность руководству и ведущим специалистам – технологам ОАО «Волжский абразивный завод» (Российская Федерация) за помощь в постановке задачи и конструктивные замечания при обсуждении результатов моделирования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Щербакова Валентина Борисовна* – младший научный сотрудник Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-4210-0267>. E-mail: valya1998@mail.ru; Гринчук Павел Семенович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, заведующий отделением теплофизики Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0002-4124-3186>. E-mail: gps@hmti.ac.by

Вклад авторов: Щербакова Валентина Борисовна – проведение термодинамического моделирования, обобщение данных, написание и оформление текста рукописи; Гринчук Павел Семенович – обоснование концепции исследования, интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Щербакова, В. Б. Термодинамическое моделирование формирования карбида кремния в процессе Ачесона в нестехиометрических смесях / В. Б. Щербакова, П. С. Гринчук // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 106–113. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-106-113>

Поступила в редакцию: 23.10.2023

Доработанный вариант: 13.02.2024

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

© Щербакова В. Б., Гринчук П. С., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Review

Valentina B. Shcherbakova*, Pavel S. Grinchuk

A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
15, P. Brovka Str., Minsk, 220072, Republic of Belarus

**THERMODYNAMIC MODELING OF SILICON CARBIDE FORMATION DURING THE ACHESON
PROCESS IN NON-STOICHIOMETRIC MIXTURES**

Abstract. A brief review and critical evaluation of the literature related to the mechanism of carbothermic reduction of silicon oxide is presented. To resolve the contradictions in the literature data about the number of chemical reactions and key intermediate substances during the Acheson process, thermodynamic modeling of products of carbothermic reduction of silicon (IV) oxide at 1 bar total pressure was carried out. It was determined that CO₂ and Si were absent among the intermediates at temperatures close to the silicon carbide formation temperature (from 1520 to ~2500 °C). Out of several dozen possible reactions, the two dominant reactions that result in the formation of silicon carbide in the Acheson process were identified. The effect of reagents temperature from 1000 to 3000 °C, bulk and local deviation from stoichiometry of the initial mixture on the composition of the reaction products was discovered. Obtained new data explains some empirical observations and greatly simplifies the physicochemical modeling of the Acheson process.

Keywords: silicon carbide, Acheson process, thermodynamic modeling, Gibbs minimization, carbothermal reduction

Acknowledgements: the authors express their gratitude to the management and leading technologists of JSC “Volga Abrasive Plant” (Russian Federation) for their help in setting the task and constructive comments when discussing the simulation results.

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

Information about the authors: *Valentina B. Shcherbakova** – Junior Researcher at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-4210-0267>. E-mail: valya1998@mail.ru; *Pavel S. Grinchuk* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci (Physics and Mathematics), Head of the Thermophysics Department at A. V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-4124-3186>. E-mail: gps@hmti.ac.by

Contribution of the authors: *Valentina B. Shcherbakova* – thermodynamical modeling, data summarization, writing and formatting of the text of the manuscript; *Pavel S. Grinchuk* – substantiation of the concept, interpretation of the results, editing of the text of the manuscript.

For citation: Shcherbakova V. B., Grinchuk P. S. Thermodynamic modeling of silicon carbide formation during the Acheson process in non-stoichiometric mixtures. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 106–113 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-106-113>

Received: 23.10.2023

Modified: 13.02.2024

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. Керамика на основе карбида кремния (SiC) представляет собой материал с широким спектром практического приложения – от абразивных инструментов до космических зеркал и конструктивных элементов ядерных реакторов. Основными способами получения SiC являются: процесс Ачесона и СВС (самораспространяющийся высокотемпературный синтез) – для порошков технического качества, CVD (Chemical Vapor Deposition) – для покрытий и пленок, метод ЛЭТИ и метод Лели – для монокристаллов. При этом два последних способа направлены на получение монокристаллического карбида кремния для полупроводниковой промышленности и требуют использования в качестве исходного сырья чистого поликристаллического карбида кремния.

Процесс Ачесона в настоящее время является основным промышленным способом получения технического карбида кремния (карборунда в русскоязычной литературе) в силу относительной простоты и дешевизны процесса, возможности организации крупнотоннажного производства [1]. Объем мировой выработки этого материала составляет более 1 млн т в год [2]. Однако в деталях технологии получения SiC все еще остаются открытые вопросы, в частности не до конца изучены физико-химические процессы. Это не позволяет полноценно улучшать качество получаемого материала и снижать удельные энергозатраты при его производстве.

В данный момент помимо теоретического моделирования процесса Ачесона выполняются его исследования на лабораторных установках [3, 4]. Однако температура внутри лабораторных реакторов не превышает 2000 °C, что не дает возможности изучать все протекающие в промыш-

ленном масштабе процессы. Так, известно, что температура в центральной части промышленной печи (внутри зерна) может превышать 2500 °С, что косвенно подтверждается частичным разложением полученного карбида кремния вблизи зерна [5]. При таких значениях температуры возможно протекание процессов разложения готового продукта, снижающих выход карбида кремния. Инструментом для понимания механизма протекающих реакций и способов влияния на состав и выход продукта может стать термодинамическое моделирование. Отметим, что условия протекания карботермического восстановления кремнезема в печах Ачесона далеки от равновесных, а это может отразиться на сопоставлении результатов расчетов с эмпирическими данными.

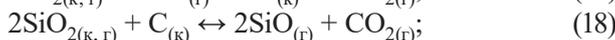
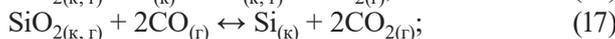
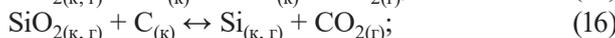
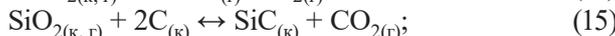
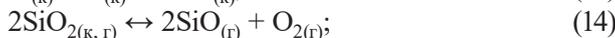
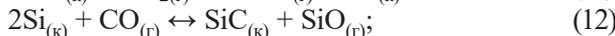
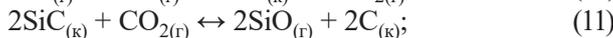
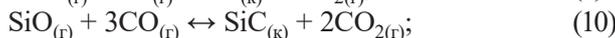
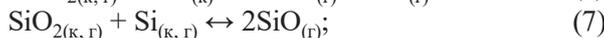
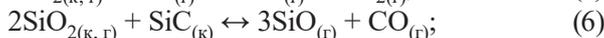
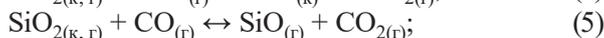
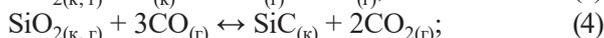
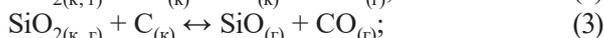
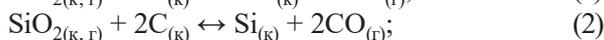
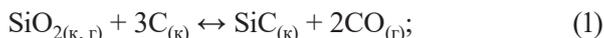
Таким образом, по нашему мнению, открытым остается вопрос об основных каналах (химических реакциях), отвечающих за процесс синтеза в широком диапазоне температур. Кроме того, на данный момент не описано влияние соотношения исходных реагентов на удельный выход получаемого карбида кремния.

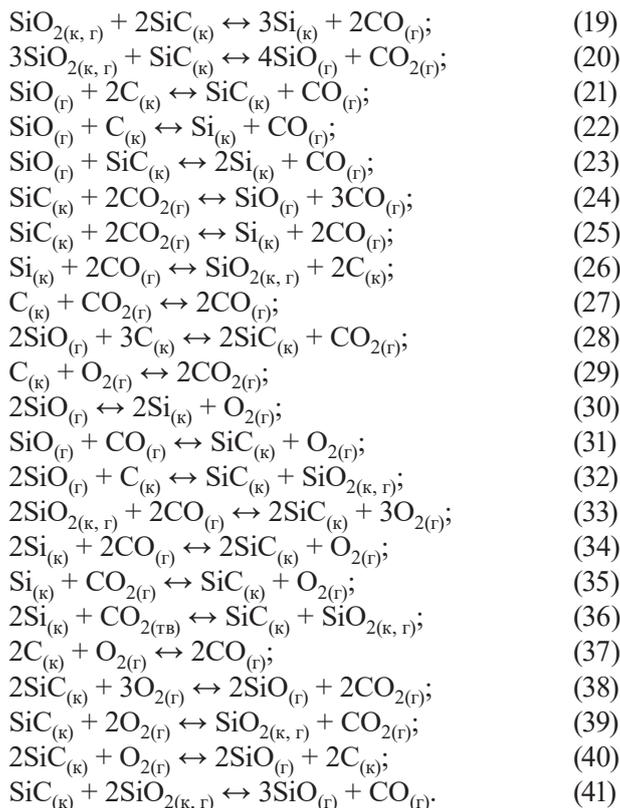
Данная работа посвящена проблеме термодинамического расчета равновесного состава смеси продуктов реакции карботермического восстановления SiO_2 в диапазоне температур до 3000 °С с учетом отклонения от стехиометрии и призвана улучшить понимание процесса Ачесона.

Методика определения химического состава равновесной смеси при заданных условиях.

Расчеты проводились с использованием программного обеспечения HSC Chemistry 6.0. Данная программа использует метод минимизации энергии Гиббса, который основан на расчете химического состава равновесной смеси, имеющей минимум свободной энергии в заданных условиях. Преимущество этого способа расчета заключается в том, что исходными данными являются химические количества исходных веществ и температурный интервал. Это позволяет не вводить весь массив возможных химических реакций [6]. Особенности данной программы также является то, что в результатах расчетов не указывается соотношение жидкой и твердой фаз, а только конденсированного и газообразного состояний вещества.

Исходя из присутствия в реакционной смеси углерода, кремния и кислорода определяется перечень веществ, которые могут образовываться как интермедиаты или конечные вещества, и, в дальнейшем, набор вероятных химических реакций, которые будут приводить к образованию или расходованию этих соединений. Так как известно, что в процессе Ачесона выделяется большое количество газообразных веществ, в первую очередь оксид углерода (II), то наличие азота, источник которого – воздух в порах между частицами, можно не учитывать. Тогда возможными компонентами смеси могут являться $\text{C}_{(к)}$, $\text{CO}_{(г)}$, $\text{SiC}_{(к)}$, $\text{CO}_{2(г)}$, $\text{O}_{2(г)}$, $\text{Si}_{(к)}$, $\text{Si}_{(г)}$, $\text{SiO}_{(г)}$, $\text{SiO}_{2(к)}$, $\text{SiO}_{2(г)}$, где индекс (г) обозначает газообразное состояние вещества, (к) – конденсированную фазу. Таким образом, можно составить набор реакций, которые теоретически могут протекать в процессе Ачесона:





Количество реакций должно еще как минимум удвоиться, так как следует учитывать возможность протекания процессов в обратном направлении.

В таблице приводятся результаты краткого обзора реакций, использованных для моделирования процесса Ачесона в [1, 7–15]. Как можно видеть, кроме суммарной реакции (1), наиболее часто используются реакции (3), (5), (21), (27). При этом выбор реакций достаточно ограничен и в определенной мере произволен. В литературных источниках нет единого мнения о наборе протекающих реакций, фактически отсутствует аргументация выбора того или иного набора реакций. В большинстве случаев предполагается, что процесс протекает через образование легучего $\text{SiO}_{(\text{г})}$, однако вопрос о химическом пути его образования, а также наличии в смеси углекислого газа или кислорода каждый автор решает индивидуально.

Разнообразие химических реакций, используемых для описания процесса Ачесона в [1, 7–15]

Chemical reactions used in [1, 7–15] to describe the Acheson process

Номер реакции Reaction number																		Литературный источник Literary source	
1	3	5	6	7	8	12	13	14	17	18	21	22	23	24	25	26	27	28	
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[7]
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[8], [9]
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[10]
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[11]
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[12]
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[13]
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[1]
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[14]
■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	[15]

Примечание: номер реакции в таблице соответствует нумерации реакций в тексте статьи.

Note: the reaction number in the table corresponds to the numbering of reactions in the text of the article.

Результаты термодинамического моделирования. Авторами настоящей статьи произведены две серии расчетов, относящихся к стехиометрической и нестехиометрическим смесям.

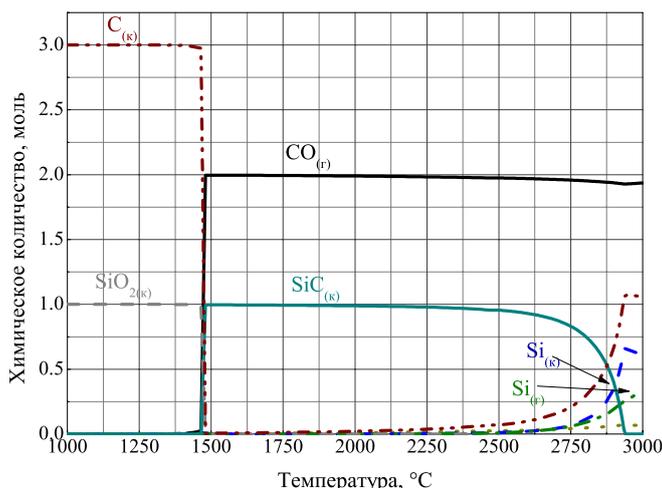


Рис. 1. Результаты термодинамического моделирования зависимости состава равновесной стехиометрической смеси от температуры в интервале 1000–3000 °C

Fig. 1. Results of thermodynamic modeling of the dependence of the composition of the equilibrium stoichiometric mixture on temperature in the intervals of 1000–3000 °C

Первая часть моделирования осуществлена для стехиометрической смеси реагентов без примесей. Изучение химического состава равновесной смеси, в которой исходные вещества содержались в стехиометрическом количестве ($n(\text{SiO}_2) : n(\text{C}) = 1 : 3$) (рис. 1) показало, что среди продуктов отсутствуют CO_2 и кислород, участие которых в механизме карботермического восстановления кварцевого песка предполагается во многих работах (см. таблицу). Полученные данные позволяют предположить, что механизм сложной реакции (1) включает стадии образования и расходования $\text{SiO}_{(г)}$, однако при значениях температуры до 2500 °C не включает в себя образование элементарного кремния даже в качестве интермедиата. Отметим, что при повышении температуры постепенно происходит увеличение содержания элементарного углерода и кремния, что хорошо согласуется с наблюдаемым на практике образованием вблизи нагревательного элемента слоя графита, восстановленного из карборунда. Полученные данные позволяют выделить предполагаемый основной путь восстановления кремнезема, а именно реакции (3) и (21): $\text{SiO}_{2(к)} + \text{C}_{(к)} = \text{SiO}_{(г)} + \text{CO}_{(г)}$; $\text{SiO}_{(г)} + 2\text{C}_{(к)} = \text{SiC}_{(к)} + \text{CO}_{(г)}$.

Отметим, что этот вывод позволяет существенно упростить и ускорить процесс моделирования задачи карботермического восстановления. При этом важно обозначить, что, согласно результатам термодинамического моделирования, разложение карборунда до простых веществ в заметной степени происходит при температурах выше 2550 °C.

По брутто-реакции (1) можно рассчитать максимальное теоретическое количество карбида кремния, получаемое из 1 кг стехиометрической шихты (массовое соотношение $\text{SiO}_2 : \text{C} = 5 : 3$). Верхний теоретический предел оказывается равным 0,42 кг продукта на 1 кг шихты. Отметим, что реальный выход в большинстве случаев в силу ряда причин составляет менее 50 % от теоретического максимума. Это дополнительно подтверждает актуальность поиска оптимальных условий протекания процесса Ачесона прежде всего с помощью более детального теоретического анализа.

Вторая серия расчетов относилась к нестехиометрической смеси реагентов. При подготовке шихты для проведения процесса Ачесона в промышленных условиях погрешность взвешивания реагентов составляет ~ 1 %. Поэтому можно ожидать, что условия протекания процесса по большим объемам реагентов в среднем близки к стехиометрическим, но могут отклоняться от стехиометрии на величину порядка единиц процентов. Результаты расчета выхода SiC для фиксированной температуры (2000 °C) и варьируемого состава исходной смеси подтверждают, что даже незначительное локальное отклонение от стехиометрии приводит к снижению выхода целевого продукта (рис. 2). Следует отметить, что при сравнении потерь в условиях равного отклонения от стехиометрии в разные стороны наблюдается определенная асимметрия – более чем 10-кратная разница в потерях продукта в случае избытка оксида кремния.

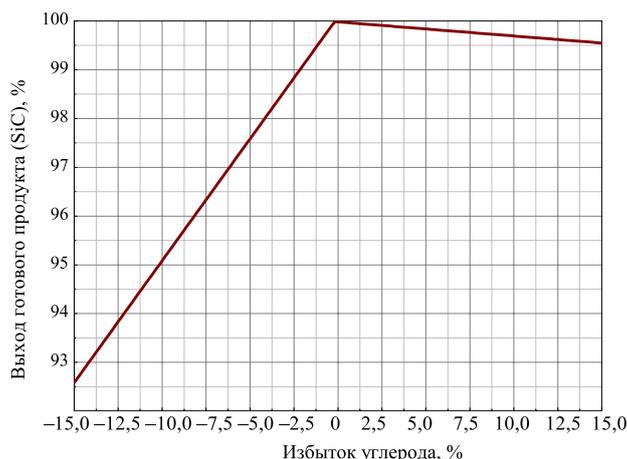


Рис. 2. Выход карбида кремния в процессе Ачесона при температуре реакции 2000 °С и различном отклонении состава шихты от стехиометрии

Fig. 2. Silicon carbide yield at Acheson reaction at the temperature of 2000 °C and different mixture composition deviation from stoichiometry

Так, при избытке углерода на 1, 2 и 5 % выход продукта составляет соответственно 99,9; 99,9 и 99,8 % соответственно, а при избытке на 1, 2 и 5 % диоксида кремния – 99,5; 99,1 и 97,6 % соответственно. Таким образом, для большего выхода продукта предпочтительнее работать с небольшим избытком углеродного сырья.

Картина еще больше может отличаться от идеализированной ситуации при рассмотрении более мелких пространственных масштабов. Исходные реагенты являются твердыми. Поэтому состав смеси будет сильно флуктуировать на масштабах порядка нескольких характерных диаметров частиц шихты. Для процесса Ачесона это соответствует масштабу от нескольких миллиметров до сантиметра. Поэтому представляет интерес изучение влияния локальной более сильной нестехиометричности состава шихты на состав продуктов [16]. Для оценки этого эффекта нами было выполнено моделирование для составов, значительно отстоящих от точки стехиометрии (с 20%-ным избытком каждого из реагентов).

Результаты расчетов показали, что значительный избыток оксида кремния приводит к более плавному возрастанию выхода карбида кремния при росте температуры с 1600 по 1750 °С. Также наблюдается увеличение равновесного количества газообразного монооксида кремния, что говорит о неполном прохождении реакции (21) (рис. 3, а).

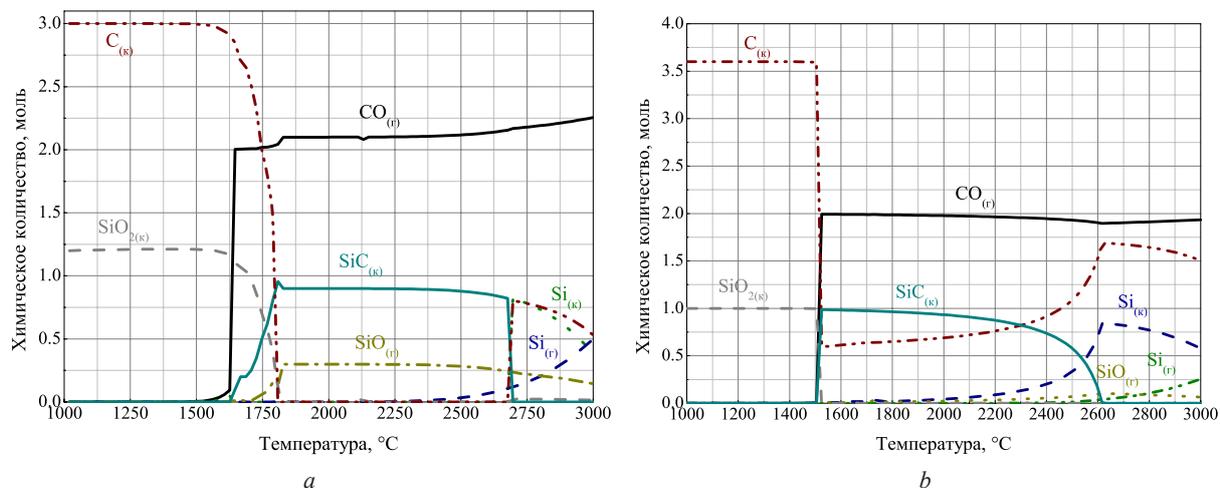


Рис. 3. Состав равновесной смеси при 20%-ном избытке оксида кремния (а) и при 20%-ном избытке углерода (b)

Fig. 3. Composition of the equilibrium mixture with 20% excess of silicon oxide (a) and 20% excess of carbon (b)

Количество образовавшегося карбида кремния в этой ситуации составляет ~ 75 % от теоретического. При этом оставшаяся часть атомов кремния переходит в газовую фазу, то есть становятся потерями. В свою очередь существенный избыток углерода обуславливает в основном уменьшение термической устойчивости карбида кремния, однако без снижения его количества при низких, до ~ 2000 °С, значениях температуры. Существенно, что температура разложения SiC уменьшается на ~ 300 °С (рис. 3, b) по сравнению со стехиометрической смесью (см. рис. 1).

Заключение. На основе термодинамического моделирования показано, что процесс карботермического восстановления кремнезема протекает через образование SiO_(г), а равновесная смесь в диапазоне температур от ~ 1500 до ~ 2500 °С включает SiC_(к), C_(к), CO_(г), SiO_(г). Выше этой температуры SiC_(к) постепенно разлагается с образованием C_(к), Si_(к) и Si_(г). Установлено, что значительное влияние на выход продукта оказывает соотношение реагентов, при этом для большего выхода предпочтительнее иметь избыток углерода, чем оксида кремния.

Моделирование позволило определить механизм влияния избытка оксида кремния на выход целевого продукта. Полученные данные можно использовать для оптимизации состава реакционной смеси и условий синтеза карбида кремния.

Список использованных источников

1. Гаршин, А. П. Новые конструкционные материалы на основе карбида кремния / А. П. Гаршин. – М.: Юрайт, 2021. – 182 с.
2. Применение техногенных отходов металлургических предприятий для производства карбида кремния / О. А. Полях [и др.] // Изв. высших учеб. заведений. Черная металлургия. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 5–12. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-8-5-12>
3. Gupta, G. S. An Analysis of Heat Distribution in the Production of SiC Process / G. S. Gupta, P. Raj, K. Tiwari // Procedia Manuf. – 2019. – Vol. 30 – P. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.010>
4. Derevyanko, I. V. Researching of thermophysical processes in Acheson furnace for the production of silicon carbide / I. V. Derevyanko, A. V. Zhadanos // Proc. of XIV International Ferroalloys Congress INFACON “Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry”, Ukraine, Kiev, May 31 – June 4, 2015. – Kiev, 2015. – Vol. 2. – P. 555–560.
5. Bahl, O. P. Anomalous behaviour of a small laboratory Acheson graphitization furnace / O. P. Bahl, B. S. Chauhan // Carbon. – 1974. – Vol. 12, № 2. – P. 214–216. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(74\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(74)90030-X)
6. Koukkari, P. A Gibbs energy minimization method for constrained and partial equilibria / P. Koukkari, R. Pajarre // Pure Appl. Chem. – 2011. – Vol. 83, № 6. – P. 1243–1254. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-10-09-36>
7. Matizanhuka, W. R. Gas transport mechanisms and the behaviour of impurities in the Acheson furnace for the production of silicon carbide / W. R. Matizanhuka // Heliyon. – 2019. – Vol. 5, № 4. – P. e01535. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01535>
8. Chen, C. Y. Kinetics of synthesis of silicon carbide by carbothermal reduction of silicon dioxide / C. Y. Chen, C. I. Lin, S. H. Chen // Br. Ceram. Trans. – 2000. – Vol. 99, № 2. – P. 57–62. <https://doi.org/10.1179/bct.2000.99.2.57>
9. Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing / ed. A. W. Weimer. – London: Chapman & Hall, 1997. – 671 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0071-4>
10. Agarwal, A. Influence of pellet composition and structure on carbothermic reduction of silica / A. Agarwal, U. Pad // Metall. Mater. Trans. B. – 1999. – Vol. 30, № 2. – P. 295–306. <https://doi.org/10.1007/s11663-999-0059-9>
11. Seo, W.-S. Morphology and stacking faults of β-silicon carbide whisker synthesized by carbothermal reduction / W.-S. Seo, K. Koumoto, S. Aria // J. Am. Ceram. Soc. – 2000. – Vol. 83, iss. 10. – P. 2584–2592. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01593.x>
12. Kinetics of carbothermal reduction synthesis of beta silicon carbide / A. W. Weimer [et al.] // AIChE J. – 1993. – Vol. 39, № 3. – P. 493–503. <https://doi.org/10.1002/aic.690390311>
13. Abolpour, B. Mechanism of reaction of silica and carbon for producing silicon carbide / B. Abolpour, R. Shamsoddini // Prog. React. Kinet. Mech. – 2020. – Vol. 45 – Art. ID 146867831989141. <https://doi.org/10.1177/1468678319891416>
14. Synthesis and characterization of nanostructured silicon carbide crystal whiskers by sol–gel process and carbothermal reduction / B. Li [et al.] // Ceram. Int. – 2014. – Vol. 40, № 8. – P. 12613–12616. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.099>
15. Raj, P. Silicon carbide formation by carbothermal reduction in the Acheson process: A hot model study / P. Raj, G. S. Gupta, V. Rudolph // Thermochim. Acta. – 2020. – Vol. 687. – Art. ID 178577. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178577>
16. Grinchuk, P. S. Effect of random internal structure on combustion of binary powder mixtures / P. S. Grinchuk, O. S. Rabinovich // Phys. Rev. E. – 2005. – Vol. 71, № 2. – Art. ID 026116. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.026116>

References

1. Garshin, A. P. *New Structural Materials Based on Silicon Carbide*. Moscow, Yurait Publ., 2021. 182 p. (in Russian).
2. Polyakh O. A., Rudneva V. V., Yakushevich N. F., Galevskii G. V., Anikin A. E. Application of technogenic waste of metallurgical plants for the production of silicon carbide. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 5–12 (in Russian). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2014-8-5-12>

3. Gupta G. S., Raj P., Tiwari K. An Analysis of Heat Distribution in the Production of SiC Process. *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 30, pp. 64–70. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.010>
4. Derevyanko I. V., Zhadanos A. V. Researching of thermophysical processes in Acheson furnace for the production of silicon carbide. *Proceeding of XIV International Ferroalloys Congress INFACON "Energy efficiency and environmental friendliness are the future of the global Ferroalloy industry"*, Ukraine, Kiev, May 31 – June 4, 2015. Vol. 2. Kiev, 2015, pp. 555–560.
5. Bahl O. P., Chauhan B. S. Anomalous behaviour of a small laboratory Acheson graphitization furnace. *Carbon*, 1974, vol. 12, no. 2, pp. 214–216. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(74\)90030-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(74)90030-X)
6. Koukkari P., Pajarre R. A Gibbs energy minimization method for constrained and partial equilibria. *Pure and Applied Chemistry*, 2011, vol. 83, no. 6, pp. 1243–1254. <https://doi.org/10.1351/PAC-CON-10-09-36>
7. Matizamhuka W. R. Gas transport mechanisms and the behaviour of impurities in the Acheson furnace for the production of silicon carbide. *Heliyon*, 2019, vol. 5, no. 4, pp. e01535. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01535>
8. Chen C. Y., Lin C. I., Chen S. H. Kinetics of synthesis of silicon carbide by carbothermal reduction of silicon dioxide. *British Ceramic Transactions*, 2000, vol. 99, no. 2, pp. 57–62. <https://doi.org/10.1179/bct.2000.99.2.57>
9. Weimer A. W., ed. *Carbide, Nitride and Boride Materials Synthesis and Processing*. London, Chapman & Hall, 1997. 671 p. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-0071-4>
10. Agarwal A., Pad U. Influence of pellet composition and structure on carbothermic reduction of silica. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 1999, vol. 30, no. 2, pp. 295–306. <https://doi.org/10.1007/s11663-999-0059-9>.
11. Seo W.-S., Koumoto K., Aria S. Morphology and stacking faults of β -silicon carbide whisker synthesized by carbothermal reduction. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, vol. 83, iss. 10, pp. 2584–2592. <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2000.tb01593.x>
12. Weimer A. W., Nilsen K. J., Cochran G. A., Roach R. P. Kinetics of carbothermal reduction synthesis of beta silicon carbide. *AIChE Journal*, 1993, vol. 39, no. 3, pp. 493–503. <https://doi.org/10.1002/aic.690390311>
13. Abolpour B., Shamsoddini R. Mechanism of reaction of silica and carbon for producing silicon carbide. *Progress in Reaction Kinetics and Mechanism*, 2020, vol. 45, art. ID 146867831989141. <https://doi.org/10.1177/1468678319891416>
14. Li B., Song Y.-C., Zhang C.-R., Yu J.-S. Synthesis and characterization of nanostructured silicon carbide crystal whiskers by sol–gel process and carbothermal reduction. *Ceramics International*, 2014, vol. 40, no. 8, pp. 12613–12616. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.04.099>
15. Raj P., Gupta G. S., Rudolph V. Silicon carbide formation by carbothermal reduction in the Acheson process: A hot model study. *Thermochimica Acta*, 2020, vol. 687, art. ID 178577. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2020.178577>
16. Grinchuk P. S., Rabinovich O. S. Effect of random internal structure on combustion of binary powder mixtures. *Physical Review E.*, 2005, vol. 71, no. 2, art. ID 026116. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.71.026116>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ**
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>
УДК 537.871.3Оригинальная статья**С. С. Грабчиков^{1*}, Е. А. Грабчикова¹, А. П. Драпезо², Т. И. Зубарь¹, М. И. Панасюк¹,
О. Д. Канафьев¹, А. В. Лосев², А. В. Труханов¹, В. М. Федосюк¹**¹Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, 220072, Минск, Республика Беларусь
²ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор»,
ул. Новаторская, 2Б, офис 204, 220053, Минск, Республика Беларусь**ПРОБЛЕМА ЗАЩИТЫ ЧЕЛОВЕКА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЧАСТОТНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ В СОВРЕМЕННОМ ОБЩЕСТВЕ.
ВОЗМОЖНЫЕ ПУТИ ЕЕ РЕШЕНИЯ**

Аннотация. Рассмотрена проблема воздействия низкочастотных электромагнитных полей (ЭМП), генерируемых электротранспортными средствами (ЭТС) и бытовыми приборами, на организм человека. Приведены данные по влиянию ЭМП на здоровье человека и нормативных документов, устанавливающих требования по электромагнитной безопасности. В качестве перспективного метода решения данной проблемы рассмотрен способ электромагнитного экранирования, представлены материалы для реализации данного метода. Экспериментально измерены уровни электромагнитного излучения ряда ЭТС и бытовых электрических приборов. Расчетным методом проведена оценка эффективности электромагнитного экранирования материалов на основе однослойных покрытий сплавов Ni₈₀Fe₂₀, многослойных пленочных структур Ni₈₀Fe₂₀/Cu и аморфных металлических сплавов АМАГ172. Показано, что электромагнитные экраны на основе данных материалов значительно снижают уровни воздействия ЭМП ЭТС и бытовых электроприборов на человека, что позволяет приблизиться к установленным гигиеническим нормативам и обеспечить требования нормативных документов по предельно допустимым уровням воздействия ЭМП.

Ключевые слова: электромагнитное экранирование, низкочастотные электромагнитные поля, электротранспортные средства, электрические приборы, электромагнитная безопасность

Благодарности: работа выполнена в рамках подпрограммы 7 «Развитие электротранспорта» Государственной программы «Научное развитие технологий и техника» на 2021–2025 годы.

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук В. М. Федосюк.

Информация об авторах: Грабчиков Сергей Степанович* – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: gss@ifftp.bas-net.by; Грабчикова Елена Александровна – старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: grabchikova_e@bk.ru; Драпезо Александр Петрович – директор ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор». E-mail: vgs-05@mail.ru; Зубарь Татьяна Игоревна – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>. E-mail: fix.tatyana@gmail.com; Панасюк Мария Игоревна – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0003-0730-2100>. E-mail: maria.panasiuk.99@gmail.com; Канафьев Олег Дмитриевич – младший научный сотрудник лаборатории физики магнитных пленок Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: Olegkan96@mail.ru; Лосев Алексей Владимирович – инженер ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор». E-mail: vgs-05@mail.ru; Труханов Алексей Валентинович – док-

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

тор физико-математических наук, заместитель генерального директора Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. <https://orcid.org/0000-0003-3430-9578>. E-mail: trukhanov@physics.by; Федосюк Валерий Михайлович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор физико-математических наук, генеральный директор Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению. E-mail: fedosyuk@physics.by

Вклад авторов: *Грабчиков Сергей Степанович* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, анализ и обобщение литературных данных, планирование исследований по изучению способов электромагнитного экранирования, обобщение и интерпретация результатов исследования, формулировка выводов; *Грабчикова Елена Александровна* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, обобщение и интерпретация результатов исследования, применение математических методов для анализа данных, отслеживание воспроизводимости результатов; *Драпезо Александр Петрович* – создание модели исследования, планирование исследований по изучению эффективности экранирования различных материалов, проведение инструментальных исследований уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрооборудованием; *Зубарь Татьяна Игоревна* – разработка дизайна экспериментального исследования, сбор и систематизация данных; пробоподготовка образцов на основе однослойных покрытий сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, многослойных пленочных структур $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$; *Панасюк Мария Игоревна* – синтез образцов на основе однослойных покрытий сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом; *Канафьев Олег Дмитриевич* – сбор данных литературы, анализ и обобщение данных литературы, проведение инструментальных исследований уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрооборудованием электромобилей; *Лосев Алексей Владимирович* – применение статистических и математических методов для анализа результатов исследования, проведение инструментальных исследований уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрооборудованием электромобилей и уровней магнитной составляющей индукции низкочастотного электромагнитного поля бытовых электроприборов; *Труханов Алексей Валентинович* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, обобщение и интерпретация результатов исследования; *Федосюк Валерий Михайлович* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, создание модели исследования.

Для цитирования: Проблема защиты человека от воздействия низкочастотных электромагнитных полей в современном обществе. Возможные пути ее решения / С. С. Грабчиков [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 114–128. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>

Поступила в редакцию: 31.01.2024

Доработанный вариант: 23.05.2024

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Original article

Sergey S. Grabchikov^{1*}, Elena A. Grabchikova¹, Alexander P. Drapezo², Tatiana I. Zubar¹, Maria I. Panasyuk¹,
Oleg D. Kanafyev¹, Alexey V. Losev², Alexey V. Trukhanov¹, Valery M. Fedosyuk¹

¹Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science,
19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus

²Vist Group Sensor Scientific and Technical Center LLC,
2B, office 204, Innovatorskaya Str., 220053, Minsk, Republic of Belarus

THE PROBLEM OF PROTECTING A PERSON FROM THE EFFECTS OF LOW-FREQUENCY ELECTROMAGNETIC FIELDS IN MODERN SOCIETY. POSSIBLE WAYS TO SOLVE IT

Abstract. The paper considers the problem of the impact of low-frequency electromagnetic fields (EMF) generated by electric vehicles (EV) and household appliances on humans in modern society. The data on the effect of EMF on human health and regulatory documents establishing requirements for electromagnetic safety are presented. The method of electromagnetic shielding and materials for the implementation of this method are considered as a promising method for solving the problem. The levels of electromagnetic radiation from a number of EV and household electrical appliances have been experimentally measured. The efficiency of electromagnetic shielding of materials based on single-layer coatings of $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloys, multilayer film structures $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ and amorphous metal alloys AMAG172 has been estimated using a computational method. It is shown that electromagnetic screens based on these materials significantly reduce the levels of exposure to EMF of EV and household electrical appliances on humans, which allows us to approach the hygienic standards recommended by doctors and meet the requirements of regulatory documents on remote control.

Keywords: electromagnetic shielding, low-frequency electromagnetic fields, electric vehicles, electrical appliances, electromagnetic safety

Acknowledgements: the work was carried out within the framework of Subprogram 7 “Development of electric transport”, the State Program “High-tech technologies and equipment” for 2021–2025.

Conflict of interest: the author's team includes a member of the Editorial Board Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Physics and Mathematics) Valery M. Fedosyuk.

Information about the authors: *Sergey S. Grabchikov** – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Chief Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: gss@ifftp.bas-net.by; *Elena A. Grabchikova* – Senior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: grabchikova_e@bk.ru; *Alexander P. Drapezo* – Director at Vist Group Sensor Scientific and Technical Center LLC. E-mail: vgs-05@mail.ru; *Tatiana I. Zubar* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Senior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. <https://orcid.org/0000-0002-2225-9641>. E-mail: fix.tatyana@gmail.com; *Maria I. Panasyuk* – Junior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. <https://orcid.org/0000-0003-0730-2100>. E-mail: maria.panasiuk.99@gmail.com; *Oleg D. Kanafyev* – Junior Researcher of the Laboratory of Magnetic Film Physics at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: Olegkan96@mail.ru; *Alexey V. Losev* – Engineer at Vist Group Sensor Scientific and Technical Center LLC. E-mail: vgs-05@mail.ru; *Alexey V. Trukhanov* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Deputy Director General at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. <https://orcid.org/0000-0003-3430-9578>. E-mail: trukhanov@physics.by; *Valery M. Fedosyuk* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director General at Scientific and Practical Center of the National Academy of Sciences of Belarus for Materials Science. E-mail: fedosyuk@physics.by

Contribution of the authors: *Sergey S. Grabchikov* – substantiation of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), development of research methodology, analysis and generalization of literature data, planning of research on the study of electromagnetic shielding methods, generalization and interpretation of research results, formulation of conclusions; *Elena A. Grabchikova* – substantiation of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), development of research methodology, generalization and interpretation of research results, application of mathematical methods for data analysis, tracking the reproducibility of results; *Alexander P. Drapezo* – creation of a research model, planning of studies on the effectiveness of shielding of various materials, conducting instrumental studies of the intensity levels of magnetic fields generated by electrical equipment; *Tatiana I. Zubar* – design development of an experimental study, data collection and systematization, preparation of samples based on single-layer $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloys coatings, $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ multilayer film structures; *Maria I. Panasyuk* – synthesis of samples based on single-layer $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloys coatings, editing of the text of the manuscript, design of the manuscript, work with graphic material; *Oleg D. Kanafyev* – collection of literature data, analysis and generalization of literature data, carrying out instrumental studies of the intensity levels of magnetic fields generated by electric equipment of electric vehicles; *Alexey V. Losev* – application of statistical and mathematical methods to analyze the results of the study, conducting instrumental studies of the intensity levels of magnetic fields generated by electric equipment of electric vehicles and the levels of the magnetic component of induction of the low-frequency electromagnetic field of household electrical appliances; *Alexey V. Trukhanov* – substantiation of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), development of research methodology, generalization and interpretation of research results; *Valery M. Fedosyuk* – substantiation of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), development of research methodology, creation of a research model.

For citation: Grabchikov S. S., Grabchikova E. A., Drapezo A. P., Zubar T. I., Panasyuk M. I., Kanafyev O. D., Losev A. V., Trukhanov A. V., Fedosyuk V. M. The problem of protecting a person from the effects of low-frequency electromagnetic fields in modern society. Possible ways to solve it. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 114–128 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-114-128>

Received: 31.01.2024

Modified: 23.05.2024

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. В последние годы в результате бурного развития и расширенного применения электротехнической, радиоэлектронной, информационной, транспортной и бытовой техники в сфере жизнедеятельности людей значительно повысился уровень низкочастотных электромагнитных полей (ЭМП), ухудшилась электромагнитная экология человека [1, 2]. Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) рассматривает проблему негативного воздействия ЭМП на экологию человека как приоритетную для мирового сообщества¹ и определяет электромагнитный смог как одну из четырех главных составляющих при загрязнении окружающей среды (химические вещества, механические загрязнители, изменение физических характеристик, биологические загрязнители). Согласно международной классификации, волны ЭМП по частотам разделяются на крайне низкие (3–30 Гц), сверхнизкие (30–300 Гц), инфранизкие (300–3000 Гц),

¹ The International EMF Project // World Health Organization. URL: <https://www.who.int/initiatives/the-international-emf-project> (date of application: 22.11.2023).

очень низкие (3000–30 000 Гц) и низкие (30 000–300 000 Гц). Для удобства, назовем рассмотренные в статье ЭМП частотой от 10 до 10 000 Гц низкочастотными ЭМП (НЧ ЭМП).

Среди актуальных тенденций развития современного общества, связанных с проблемой электромагнитной экологии, можно выделить переход на электротранспортные системы передвижения и интенсификацию потребления электрической энергии в жилом фонде. Во многих развитых странах реализуются национальные программы развития электрического транспорта (ЭТС). Однако активное использование данных транспортных средств обуславливает значительное повышение уровня интенсивности электромагнитного окружения людей, а следовательно, и электромагнитной загрязненности. Еще одним примером быстрого развития электротехнических технологий и вместе с тем возрастания воздействия ЭМП на человека может служить сфера жилищного строительства, в которой происходит переход на системы насыщенного и интенсивного потребления электрической энергии в жилом фонде – так называемые умный дом и электродом.

В связи с этим разработка методов контроля электромагнитной обстановки, создание материалов и технологий, обеспечивающих снижение уровней НЧ ЭМП, формирование электромагнитной среды обитания человека, соответствующей медицинским нормативным документам, являются актуальными направлениями исследований.

Обзор проблемы электромагнитной экологии человека. В России, Беларуси, США, Японии и других странах нет стандартов, устанавливающих допустимые уровни НЧ ЭМП для электромобилей. Максимально допустимые уровни воздействия НЧ ЭМП, рекомендованные Международной комиссией по защите от неионизирующих излучений (ICNIRP), варьируются от 200 мкТл для частоты 40 Гц, до 100 мкТл для 800 Гц и до 20 мкТл для 3 кГц [3]. Вместе с тем многочисленные рецензируемые лабораторные исследования выявили биологические эффекты от ограниченного воздействия НЧ ЭМП. Исследования показали, что рекомендации по уровням ЭМП, установленные ICNIRP, неадекватны для защиты здоровья человека. Более 230 экспертов по ЭМП подписали Международное обращение ученых по ЭМП, в котором призывают ВОЗ установить более строгие рекомендации по НЧ ЭМП [4].

Государственные нормативные документы, устанавливающие требования по безопасности среды обитания человека в условиях воздействия ЭМП промышленной частоты 50 Гц и постоянного магнитного поля, декларируют достаточно жесткие требования. В нормативных документах Республики Беларусь и Российской Федерации¹ установлены предельно допустимые уровни (ПДУ) воздействия на человека переменных ЭМП промышленной частоты 50 Гц – для магнитной составляющей ЭМП значения индукции (напряженности) не должны превышать 5 мкТл (4,0 А/м). В «Гигиенических нормативах и требованиях к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»² определены требования для значений ПДУ изменений постоянного МП (ПМП) среды обитания человека. Значения ПДУ изменений индукции ПМП составляют не более 1,5 раз относительно магнитного поля Земли (МПЗ).

Медиками рекомендован гигиенический норматив уровня НЧ ЭМП для среды обитания человека не более 0,2 мкТл. Как известно [5], внешние НЧ ЭМП индуцируют в организме человека электрические поля и токи, которые оказывают воздействие на нервы, мышцы и вызывают изменение возбудимости нервных клеток в центральной нервной системе. Согласно исследованиям [6], постоянное нахождение человека в условиях НЧ ЭМП с индукцией 0,2÷6 мкТл является фактором риска возникновения сердечно-сосудистых и онкологических заболеваний, астении,

¹ О специфических санитарно-эпидемиологических требованиях к содержанию и эксплуатации объектов, являющихся источниками неионизирующего излучения: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 4 июня 2019 г. № 360. URL: https://minzdrav.gov.by/upload/dadvfiles/law/postanovlenie_SM_4%20июня%202019%20г.%20№%20360.pdf (дата обращения: 22.11.2023) ; Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»: постановление Главного Государственного санитарного врача РФ, 28 янв. 2021 г., № 2 // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 22.11.2023).

² Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания»...

ослабления иммунитета и репродуктивных свойств. Авторы [7] выявили связь между воздействием НЧ ЭМП и развитием у человека различных клинических заболеваний (онкологические заболевания, генотоксичность, нейродегенеративные заболевания, бесплодие, врожденные дефекты и др.).

Экспериментальные данные отечественных и зарубежных исследователей свидетельствуют о высокой биологической активности электромагнитных полей в широком частотном диапазоне [8–10]. При этом уровень НЧ ЭМП, генерируемых электромобилями, в $10\div 100$ раз превосходит рекомендованный медиками гигиенический норматив НЧ ЭМП – 0,2 мкТл [8]. Данные различных исследователей значительно расходятся, что, по-видимому, связано с различиями в конструкциях электромобилей, мощностях их двигателей и материалах корпуса. Согласно данным [9], в гибридных электромобилях в диапазоне частот 5–2000 Гц генерируются магнитные поля с индукцией до 3,5 мкТл, при зарядке батареи уровни полей достигают 6,5 мкТл. Исследования гибридного автомобиля «Крайслер» в диапазоне частот $0\div 50$ кГц показали [10], что в зоне задних колес, где расположена батарея, при силе тока 200 А значения индукции ЭМП достигали 120 мкТл, а пространственные градиенты доходили до 100 мкТл/м. Данные работы [7] свидетельствуют о том, что максимальный уровень ЭМП, встречающихся в электромобилях, составляет 140 мкТл и основная часть магнитной энергии концентрируется в диапазоне частот 0,001–10 Гц. Наиболее интенсивные электромагнитные поля регистрировались во время ускорения и торможения ЭТС. В [11] исследовали генерируемые в электромобилях НЧ ЭМП в режимах разгона и зарядки батареи. Испытывали электромобили следующих марок: BMW 13, Nissan Leaf, Tesla Model 85S и Volkswagen e-ur. Показано, что в зависимости от типа машины и зоны измерений при разгоне значения ЭМП варьировались от 43,3 до 103 мкТл; а при зарядке батареи в зависимости от величины тока значения поля изменялись от 30,1 до 116,5 мкТл.

Энергопотребление в электро- и умных домах значительно возрастает по сравнению со стандартными жилыми домами. Так, согласно данным государственного предприятия «Институт жилища – НИПТИС имени С. С. Атаева» (г. Минск, Беларусь), установленная мощность, необходимая для электропитания подобных зданий, в среднем увеличивается в 5 раз. Такое увеличение электрических мощностей потребления требует нового подхода для создания нормальной электромагнитной обстановки, обеспечения ПДУ ЭМП согласно требованиям нормативных документов.

В жилом помещении предельно допустимый уровень магнитного поля частотой 50 Гц не должен превышать 5 мкТл. На практике по ряду объективных причин данное требование в основном не соблюдается и не контролируется. В нормативно-технической документации на электробытовые приборы (ОТТ, ОТУ, ГОСТ и др.), несмотря на наличие ПДУ ЭМП, вышеуказанное требование в основном отсутствует и, следовательно, никто не проверяет его выполнение ни в процессе разработки, ни в процессе производства. Анализируя применяемые сегодня решения электропотребления в электродомах (например, отопление жилых помещений с помощью электрических конвекторов), очевидно, что без применения специальных расчетных, конструктивных и технологических методов обеспечить ПДУ к ЭМП частотой 50 Гц практически невозможно.

Решение данной проблемы должно включать в себя полный цикл работ, в который входят проектирование силовых цепей питания, использование конструктивных решений (специальная силовая проводка, защитные экраны, оптимальное пространственное размещение), проведение измерений ЭМП в типовых жилых помещениях и, при необходимости, создание систем электромагнитной защиты.

Таким образом, существует проблема электромагнитной безопасности человека, есть стандарты для среды обитания человека, но нет установленных стандартов по допустимым уровням НЧ ЭМП для электромобилей. В связи с этим отсутствуют единый подход и понимание проблемы обеспечения электромагнитной безопасности человека среди медиков, пользователей и производителей ЭТС. Поэтому очевидно, что для обеспечения электромагнитной безопасности пользователей ЭТС необходимо вести поиск разумных и недорогих способов контроля уровня НЧ ЭМП, снижения напряженности НЧ ЭМП, создаваемых электрооборудованием ЭТС и электрическими приборами в жилых помещениях.

Как известно [1], магнитная составляющая ЭМП обладает гораздо более высокой проникающей способностью, чем электрическая, и защита от нее представляет очень сложную задачу. Основным и наиболее эффективным способом защиты от ЭМП является экранирование. На практике для экранирования магнитной составляющей ЭМП используют широкий ряд материалов на основе электротехнической стали, сплавов пермаллой и пермендюр, аморфных и нанокристаллических материалов [12]. В ГО «Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению» накоплен большой опыт по экранированию переменных ЭМП с применением многослойных пленочных экранов (МПЭ) [13].

В настоящей работе проведены экспериментальные исследования электромагнитного излучения ЭТС и бытовых электрических приборов, выполнены расчеты эффективности электромагнитного экранирования материалов на основе МПЭ и аморфных сплавов, перспективных для обеспечения электромагнитной безопасности человека.

Методики расчетов и эксперимента. Количественная оценка эффективности экранирования (Э) различных материалов проводилась по результатам расчетов отношений индукции (напряженности) магнитного поля в защищаемой области пространства при отсутствии экрана $B(H)$ и при наличии его $B_1(H_1)$:

$$\mathcal{E} = B/B_1 = (H/H_1). \quad (1)$$

Контроль уровня воздействия ЭМП и измерения индукции постоянного и переменного магнитного поля выполнены с помощью микротесламетра, разработанного и изготовленного в ООО «Научно-технический центр Вист групп сенсор». Прибор содержит двухканальные измерительные зонды с концентраторами магнитного поля и элементами Холла, позволяет производить измерения в диапазонах индукции $0 \pm 2,0$ мТл и частоты 0–40 кГц с чувствительностью не менее 5 нТл и нелинейностью менее 1 %. Калибровка измерительных зондов проведена на установке – источнике трехкомпонентного постоянного магнитного поля, поверенной во Всероссийском НИИ метрологии имени Д. И. Менделеева (г. Санкт-Петербург, Россия). Измерения выполнены в двух взаимно перпендикулярных ориентациях чувствительных элементов относительно источника ЭМП по каналам x и y . Контроль третьей координаты z определялся поворотом измерительного зонда на 90° . На спектрах канал x – красный цвет; канал y – желтый цвет. Ряд измерений выполнен в режиме фильтрации МПЗ (синий канал y – с фильтрацией МПЗ, черный канал x – с фильтрацией МПЗ).

Электромагнитные излучения ЭТС измерены на автомобилях следующих моделей: Tesla Model 3 Long Range, Renault Zoe и Geely геометрия А в различных местах – в зонах переднего и заднего пассажиров, возле порта зарядного кабеля. Использовались следующие режимы эксплуатации: разгон со старта; прерывистое движение разгон-торможение; равномерное движение; зарядка батареи в зоне порта зарядного кабеля. Измерения уровней НЧ ЭМП бытовых электрических приборов – конвектора Ballu ВЕР/Е-2000, электрической плиты Electrolux ЕКС954508Х, СВЧ-печи LG MW25R35GIS и отопительного котла Zerten SE-3 – выполнены в диапазоне частот 49–51 Гц.

Для расчетов эффективности экранирования (Э) использовали программное обеспечение (ПО) Finite Element Method Magnetics, Version 4.2 (femm4.2), которое позволяет определять параметры и строить картины топологий ЭМП. Расчеты выполнены в диапазонах значений $H = 10$ –500 А/м и частоты $f = 10$ –1000 Гц на плоских однослойных экранах сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и МПЭ, содержащих магнитные слои из сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ и немагнитные медные слои, и для аморфных сплавов АМАГ172 в исходном и отожженном ($T = 300$ °С; $t = 2$ ч) состояниях. Толщина аморфной ленты – 25 мкм. Размер образцов составлял 120×120 мм; общая толщина (d) – 400 мкм; толщина парциальных слоев $d_{\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}} = 40$ и 100 мкм, $d_{\text{Cu}} = 10$ мкм. Значение электрической проводимости сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (σ) = $12 \cdot 10^6$ См/м. В качестве исходных данных ПО femm4.2 также использовали результаты экспериментальных измерений магнитных свойств материалов – коэрцитивной силы (H_c), максимальной магнитной проницаемости (μ_{max}) и начальной кривой намагничивания. Измерения магнитных свойств выполнены методом баллистического гальванометра [14] на замкнутых цилиндрических образцах высотой 30 мм, внешним диаметром 45 мм и внутренним диаметром 25 мм. Намагничивающая обмотка формировалась проводом $\varnothing 0,1$ мм в количестве 100 витков, измерительная обмотка – проводом $\varnothing 0,08$ мм в количестве 200 витков.

Экспериментальные и расчетные результаты. Экспериментально полученные изображения петли гистерезиса и начальной кривой намагничивания сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ толщиной 100 мкм представлены на рис. 1. Также получены значения параметров $H_c = 36$ А/м и $\mu_{\text{max}} = 18\,000$.

Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса аморфного сплава АМАГ172 в исходном состоянии представлены на рис. 2. Значения $H_c = 0,5$ А/м; $\mu_{\text{max}} = 72\,000$ и $\sigma = 2,3 \cdot 10^6$ См/м.

Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса аморфного сплава АМАГ172 после отжига представлены на рис. 3. Значения $H_c = 0,55$ А/м и $\mu_{\text{max}} = 126\,000$.

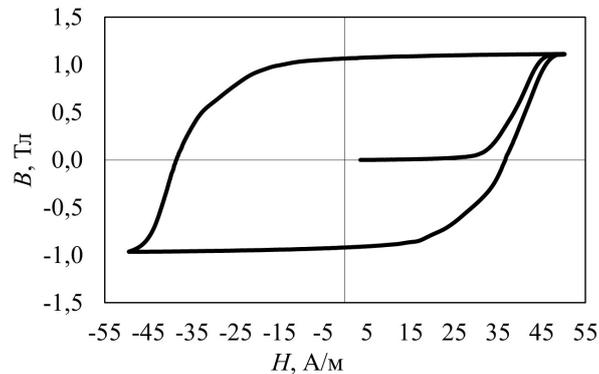


Рис. 1. Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$

Fig. 1. Initial magnetization curve and hysteresis loop of $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloy

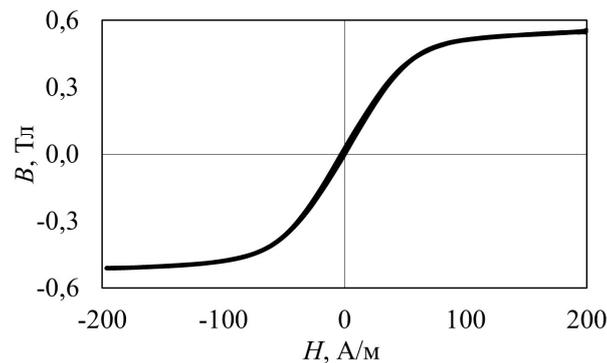


Рис. 2. Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса аморфного сплава АМАГ172 в исходном состоянии

Fig. 2. Initial magnetization curve and hysteresis loop of amorphous alloy AMAG172 in the initial state

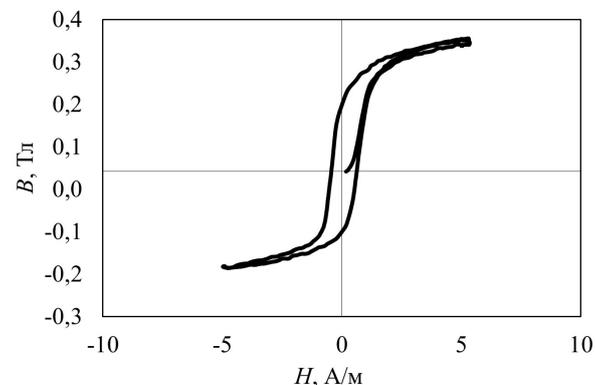


Рис. 3. Начальная кривая намагничивания и петля гистерезиса аморфного сплава АМАГ172 после отжига

Fig. 3. Initial magnetization curve and hysteresis loop of amorphous alloy AMAG172 after annealing

Результаты измерений низкочастотного электромагнитного поля электротранспортных средств. Результаты измерений уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрооборудованием электромобилей Tesla Model 3, Renault Zoe и Geely геометрия А, выполненных в диапазоне частот от 0 до 55 000 Гц, в различных зонах и режимах эксплуатации электромобилей, представлены на рис. 4, 5 и в таблице. Как уже упоминалось, в настоящее время нет единых установленных стандартов по допустимым уровням НЧ ЭМП для электромобилей. Поэтому в качестве ориентира будем использовать принятый для среды обитания человека стандарт ПДУ магнитной составляющей ЭМП частотой 50 Гц, равный 5 мкТл¹.

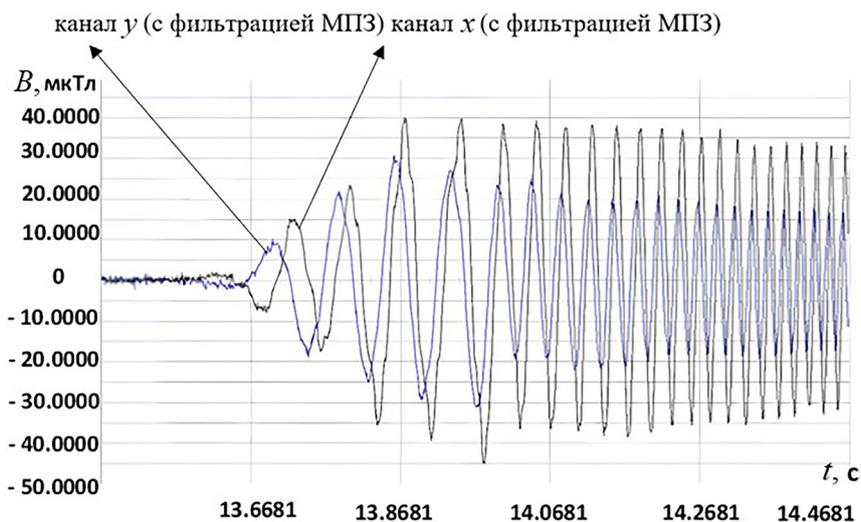


Рис. 4. Спектр низкочастотного электромагнитного поля электромобиля Tesla Model 3, измеренный в режиме фильтрации магнитного поля Земли. Режим движения «разгон со старта»

Fig. 4. The low-frequency electromagnetic field spectrum of the Tesla Model 3 electric car, measured in the Earth's magnetic field filtration mode. The driving mode is “acceleration from the start”

Значения магнитной составляющей индукции переменного электромагнитного поля и постоянного магнитного поля (мкТл), генерируемой оборудованием электромобиля в различных режимах эксплуатации
The values of the magnetic component of the induction of an alternating electromagnetic field and a permanent magnetic field (μT) generated by the equipment of an electric vehicle in various operating modes

Условия измерений	Tesla Model 3	Renault Zoe	Geely, геометрия А
Магнитная составляющая индукции электромагнитного поля, генерируемая электротранспортом в различных режимах движения, мкТл			
– разгон со старта	30–40	8–10	2–4
– прерывистое движение в режиме «разгон-торможение»	4–10	2–5	2–5
– равномерное движение	3–6	–	2–6
– зарядка батареи в зоне порта зарядного кабеля	–	5–16	–
– изменение индукции постоянного МП в режиме «прерывистое движение разгон-торможение»	330	–	280
Материал кузова	Железо/алюминий	Алюминий	Алюминий
Место измерений	Кресло задних пассажиров	Центр ног переднего пассажира	Центр ног переднего пассажира
Мощность электродвигателя, кВт	190	72	120

¹ О специфических санитарно-эпидемиологических требованиях к содержанию и эксплуатации объектов, являющихся источниками неионизирующего излучения: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 4 июня 2019 г. № 360.

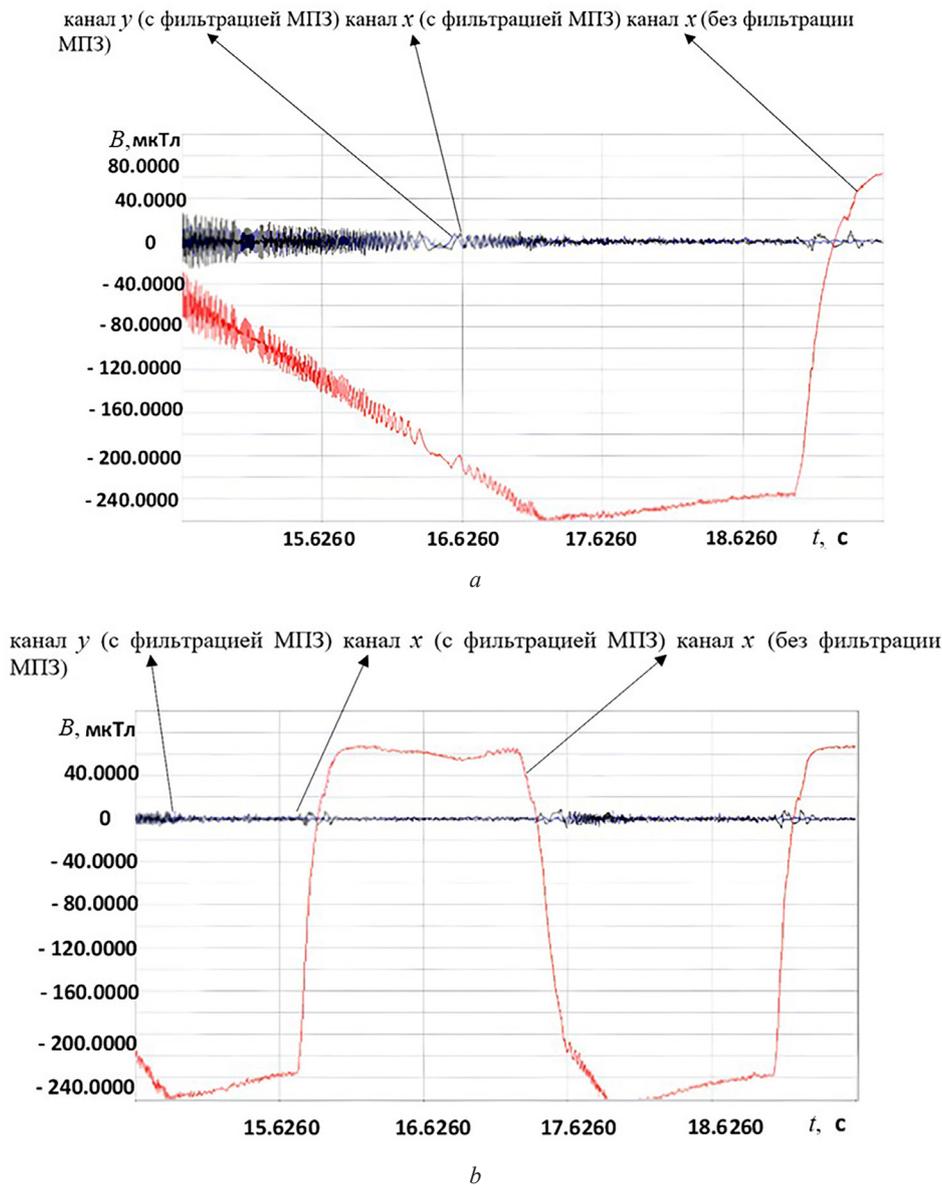


Рис. 5. Изменение постоянного магнитного поля автомобиля Tesla Model 3.
Режим движения «прерывистое движение разгон-торможение»: *a* – участок разгона,
b – участок торможения. Измерения в режимах с фильтрацией магнитного поля Земли – синий, черный;
без фильтрации магнитного поля Земли – красный

Fig. 5. Change in the permanent magnetic field of the Tesla Model 3 electric car.
Driving mode “intermittent acceleration-braking movement”:
a – the acceleration section, *b* – the braking section. Measurements with the Earth’s magnetic
field filtering are blue, black; without the Earth’s magnetic field filtering – red

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- наиболее значительное превышение ПДУ магнитного поля зафиксировано в автомобиле Tesla Model 3 с максимальной мощностью электродвигателя 190 кВт в режимах «разгон со старта» (в 6–8 раз);
- в режиме «зарядка батареи» в зоне порта зарядного кабеля автомобиля Renault Zoe превышение ПДУ достигало 3 раз;
- в режиме «прерывистое движение разгон-торможение» наблюдалась инверсия знака напряженности постоянного магнитного поля, изменения напряженности МП составляли 280 мкТл (Geele, геометрия А – 120 кВт) и 330 мкТл (Tesla Model 3 – 190 кВт), то есть изменения относительно значений напряженности магнитного поля Земли составляли 4,5 и 5 раз соответственно;

– наиболее высокий уровень защиты водителя и пассажиров обеспечивается в электромобилях, кузов которых выполнен из магнитного материала (железо), электродвигатель расположен в подкапотном пространстве и силовые кабели размещены в защитных коробах. Замена магнитного материала кузова на алюминий повышает уровень напряженности ЭМП в салоне электрокара. Важное значение также имеет расстояние, на котором расположен источник ЭМП от пользователя электротранспортного средства.

Таким образом, основными факторами, определяющими уровни генерируемого НЧ ЭМП электрооборудованием ЭТС, являются мощность электродвигателя, компоновка электрооборудования, материалы кузова и других элементов электротранспорта.

Результаты измерений низкочастотного электромагнитного поля электробытовых приборов. Как уже указывалось, измерения уровней магнитной составляющей индукции НЧ ЭМП в диапазоне частот 49–51 Гц выполнены на бытовых электроприборах: на конвекторе Ballu ВЕР/Е-2000; электрической плите Electrolux ЕКС954508Х; СВЧ-печи LG MW25R35GIS и отопительном котле Zerten SE-3. На рис. 6 приведен спектр НЧ ЭМП, излучаемый конвектором электрической мощностью 2,0 кВт на расстоянии 8–10 см. Максимальное значение индукции (B_{\max}) достигает 35 мкТл, красная зона – превышение ПДУ относительно нормативного акта¹. Установлено, что конфорка электрической плиты мощностью 1,7 кВт на расстоянии 8–10 см генерирует МП с $B_{\max} = 35$ мкТл; СВЧ-печь мощностью 1,15 кВт на расстоянии 8–10 см генерирует МП с $B_{\max} = 65$ мкТл. На рис. 7 приведен спектр НЧ ЭМП, излучаемый отопительным котлом мощностью 3,0 кВт на расстоянии 8–10 см, значения B_{\max} достигают 100 мкТл.

Анализ проблемы электромагнитной безопасности жилого фонда и измерения уровней напряженности магнитных полей, генерируемых электрическими бытовыми приборами и электрооборудованием, позволяет заключить следующее:

– уровни магнитной составляющей НЧ ЭМП, генерируемых бытовым электрооборудованием на расстоянии 8–10 см, значительно превышают ПДУ, установленные нормативными документами: конвектор мощностью 2,0 кВт – в 4–5 раз; электрическая плита мощностью 1,7 кВт – в 7–8 раз; СВЧ-печь мощностью 1,15 кВт – в 13–15 раз; отопительный котел мощностью 3,0 кВт – в 18–20 раз;

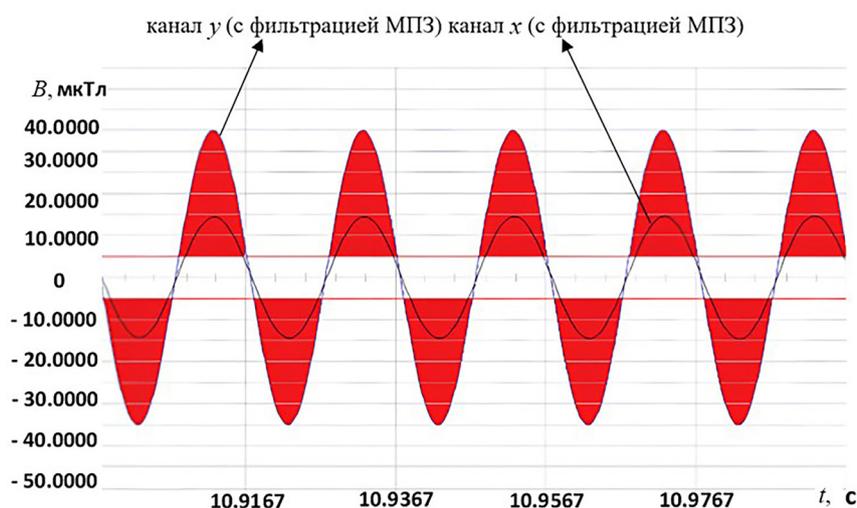


Рис. 6. Спектр низкочастотного электромагнитного поля, излучаемого конвектором мощностью 2,0 кВт на расстоянии 8–10 см; $B_{\max} = 35$ мкТл

Fig. 6. The spectrum of low-frequency electromagnetic field emitted by a 2.0 kW convector at a distance of 8–10 cm; $B_{\max} = 35$ μ T

¹ О специфических санитарно-эпидемиологических требованиях к содержанию и эксплуатации объектов, являющихся источниками неионизирующего излучения: постановление Совета Министров Респ. Беларусь от 4 июня 2019 г. № 360.

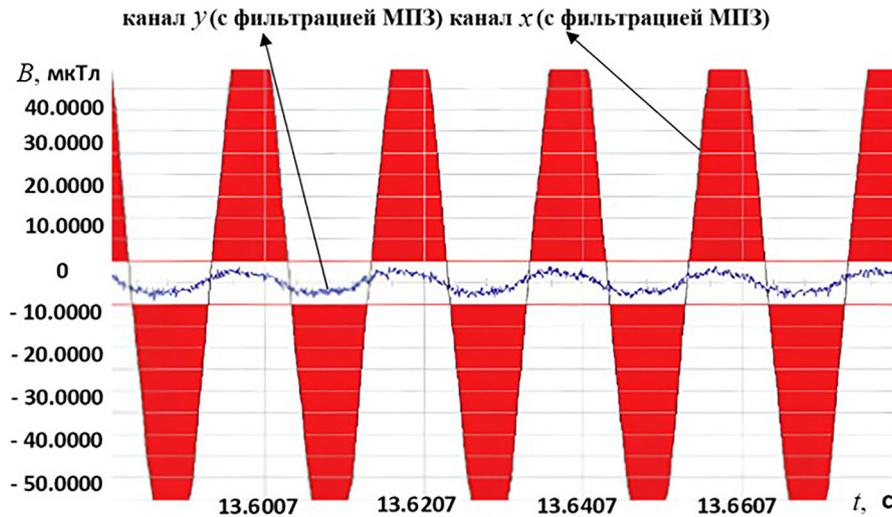


Рис. 7. Спектр низкочастотного электромагнитного поля, излучаемого отопительным котлом мощностью 3 кВт на расстоянии 8–10 см; $B_{\max} = 100$ мкТл

Fig. 7. The spectrum of low-frequency electromagnetic field emitted by a 3 kW heating boiler at a distance of 8–10 cm; $B_{\max} = 100$ μ T

– одним из перспективных технических решений является переход электропотребления жилых помещений на источники постоянного тока, поскольку нормативы ПДУ постоянного МП в 10–100 раз выше, чем нормативы ПДУ переменного ЭМП;

– необходимо отметить, что выполнение требований технического регламента уровней ЭМП промышленной частоты обязательно на стадии проектирования жилых домов, так как исправить ошибки проектирования в отношении электромагнитной безопасности при эксплуатации жилья практически невозможно;

– для обеспечения нормальной электромагнитной обстановки в жилых помещениях необходимо вести разработку методов и оборудования контроля за электромагнитной обстановкой, поиск разумных и недорогих способов снижения уровня воздействия НЧ ЭМП на человека.

Расчет эффективности экранирования магнитных материалов. Оценка эффективности электромагнитной защиты от НЧ ЭМП проведена на однослойных покрытиях сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$, МПЭ системы $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ и аморфных лентах сплавов АМАГ172 в исходном и отожженном ($T = 300$ °С; $t = 2$ ч) состояниях. Толщина аморфной ленты 25 мкм. Как видно из данных, приведенных на рис. 8, эффективность экранирования однослойных экранов сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ (см. рис. 8, а) и многослойных экранов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ (см. рис. 8, б) зависит от напряженности и частоты внешнего магнитного поля, общей и парциальной толщины МПЭ, внутреннего строения экранов. В интервале напряженностей ЭМП от 20 до 300 А/м значения эффективности экранирования практически не изменяются. Данная область магнитных полей соответствует основным уровням НЧ ЭМП, генерируемым электрооборудованием ЭТС и бытовыми электроприборами. Следует отметить, что тенденция поведения зависимостей $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$ однослойных и многослойных структур от частоты существенно отлична: в первом случае с ростом частоты эффективность экранирования снижается, во втором – увеличивается.

В случае квазистатических магнитных полей эффективность экранирования определяется механизмами шунтирования магнитного поля (замыкание силовых линий через материал с низким сопротивлением магнитному потоку), вытеснения переменного ЭМП магнитным полем вихревых токов (поверхностный эффект), а также вкладом отражения электромагнитной волны (ЭМВ) на границах раздела двух сред [1]. В области ЭМП ($f < 100$ Гц) основную роль играет механизм шунтирования, для частоты 10 Гц ход зависимостей $\mathcal{E} = \mathcal{E}(H)$ для однослойных и многослойных экранов практически одинаков, эффективность экранирования МПЭ на 5–7 % выше эффективности однослойных экранов. В данном интервале частот преобладающий механизм потерь энергии при прохождении электромагнитной волны через экран – шунтирование магнит-

ного поля материалом экрана, поэтому потери тем выше, чем выше магнитная проницаемость и площадь поперечного сечения материала экрана. Вклад поверхностного эффекта в потери энергии обычно рассматривают для частот выше 1–10 кГц, когда выполняется условие $\delta < d$, где δ – эквивалентная глубина проникновения ЭМВ в материал [1]. Согласно расчетам для сплава $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ значения δ равны 0,38 и 0,12 мм для частот 100 и 1000 Гц соответственно. Поэтому для нашего случая в качестве основных вкладов в потери энергии следует рассматривать механизмы шунтирования и отражения на границах раздела. Вклад в потери энергии от эффекта отражения ЭМВ на границах раздела, так называемый эффект многослойности [10], начинает проявляться на частотах 1000 Гц и выше. С увеличением количества слоев МПЭ «эффект многослойности» возрастает. На частоте 1000 Гц значение \mathcal{E} многослойных пленочных экранов, содержащих 10 магнитных и 10 немагнитных слоев, в 5–6 раз выше \mathcal{E} однослойной структуры эквивалентной суммарной толщины (см. рис. 8). При этом с ростом частоты эффективность однослойных экранов уменьшается, а МПЭ – увеличивается.

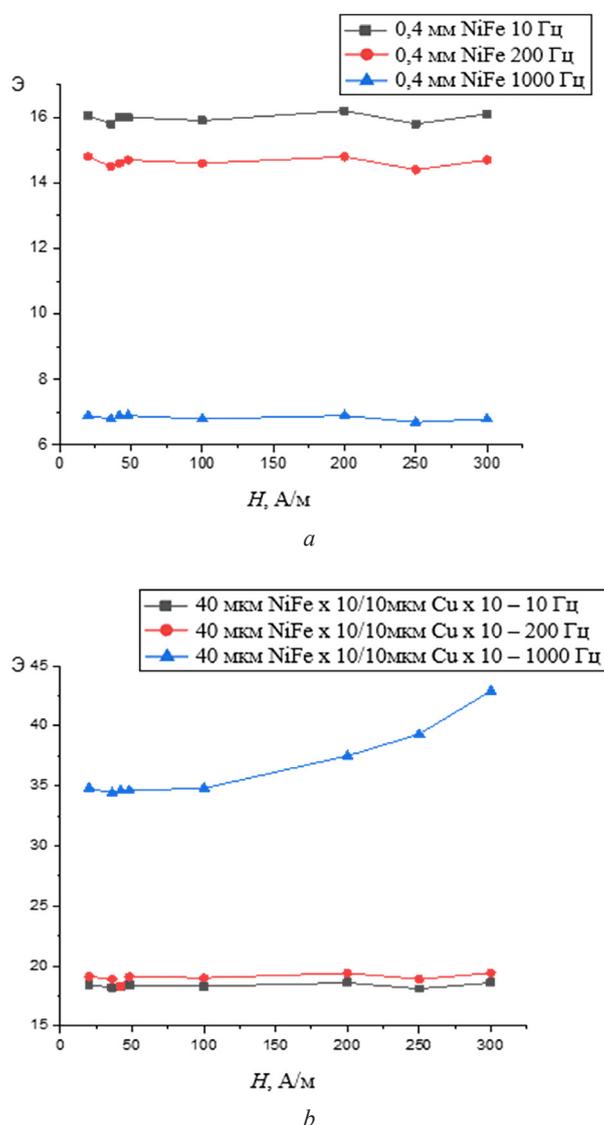


Рис. 8. Зависимости эффективности экранирования однослойных сплавов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ толщиной 0,4 мм (а) и многослойных пленочных экранов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ (b), содержащих 10 слоев $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ по 40 мкм и 10 слоев Cu по 10 мкм, от напряженности электромагнитного поля для частот 10, 200 и 1000 Гц
 Fig. 8. Dependencies of the screening efficiency of single-layer shields from $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ alloys with a thickness of 0.4 mm (a) and multilayer $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ film screens (b) containing 10 layers of $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}$ of 40 microns and 10 layers of Cu of 10 microns on the electromagnetic field intensity for frequencies 10, 200 and 1000 Hz

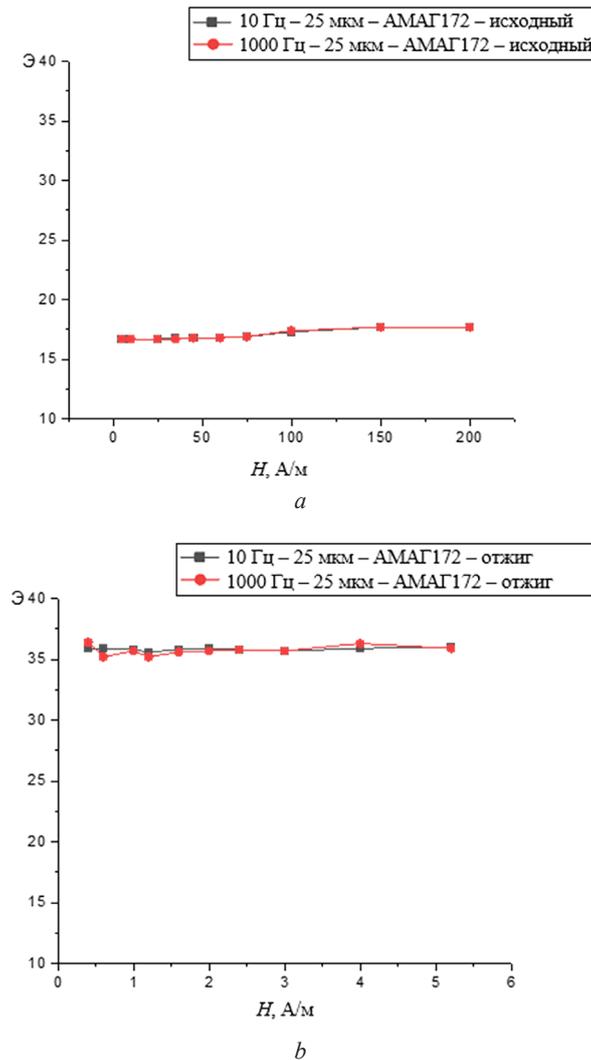


Рис. 9. Зависимости эффективности экранирования аморфных сплавов АМАГ172 в исходном состоянии (а) и после отжига (б) от напряженности электромагнитного поля для частот 10 и 1000 Гц

Fig. 9. Dependencies of screening efficiency of amorphous AMAG172 alloys in the initial state (a) and after annealing (b) on the electromagnetic field intensity for frequencies of 10 and 1000 Hz

На рис. 9 приведены зависимости эффективности электромагнитной защиты от напряженности и частоты ЭМП аморфных сплавов АМАГ172 в исходном (рис. 9, а) и отожженном (рис. 9, б) состояниях. Видно, что эффективность отожженных образцов значительно выше (3 раза), чем не отожженных, что связано с увеличением значений магнитной проницаемости в процессе термообработки. Следует также отметить, что в диапазоне частот от 10 до 1000 Гц в аморфных сплавах АМАГ172 зависимость Э от частоты не наблюдалась.

Заключение. Переход на интенсивное применение электрической энергии в транспортных средствах и жилом фонде значительно повышает уровень окружающих человека электромагнитных полей. Представленная в настоящей работе контрольно-измерительная аппаратура позволяет исследовать и контролировать топологию НЧ ЭМП в диапазонах индукции $0 \pm 2,0$ мТл и частоты 0–40 кГц, с чувствительностью не менее 5 нТл.

Измерены уровни магнитной составляющей НЧ ЭМП, генерируемой электромобилями и электробытовыми приборами. Показано, что значительное превышение ПДУ магнитного поля для электромобилей фиксируется в режимах «разгон со старта» (в 6–8 раз) и «разгон при движении» (в 5–6 раз). Основными факторами, определяющими уровни генерируемого НЧ ЭМП электрооборудованием ЭТС, являются мощность электродвигателя, компоновка электрооборудования, материалы кузова и других элементов ЭТС.

Определены уровни магнитной составляющей НЧ ЭМП, излучаемой бытовыми электроприборами в диапазоне частот 49–51 Гц. Установлено значительное превышение ПДУ относительно нормативов: конвектор мощностью 2,0 кВт превышает значения ПДУ в 4–5 раз; электрическая плита мощностью 1,7 кВт – в 7–8 раз; СВЧ-печь мощностью 1,15 кВт – в 13–15 раз; отопительный котел мощностью 3,0 кВт – в 18–20 раз.

Для обеспечения нормальной электромагнитной обстановки в жилых помещениях необходимо вести разработку методов и оборудования контроля электромагнитной обстановки, поиск разумных и недорогих способов снижения уровня воздействия НЧ ЭМП на человека.

Расчетным методом проведена оценка снижения уровня низкочастотного электромагнитного поля путем использования экранирующих материалов на основе многослойных пленочных экранов $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ и аморфных сплавов АМАГ172. Показано, что МПЭ системы $\text{Ni}_{80}\text{Fe}_{20}/\text{Cu}$ и АМАГ172 перспективны для создания систем защиты от воздействия НЧ ЭМП. Электромагнитные экраны на основе данных материалов значительно снижают уровни воздействия НЧ ЭМП электротранспорта и бытовых электроприборов на человека, что позволяет приблизиться к рекомендованным медиками гигиеническим нормативам и обеспечить требования нормативных документов по ПДУ.

Список использованных источников

1. Кечиев, Л. Н. Экранирование технических средств и экранирующие системы / Л. Н. Кечиев, Б. Б. Акбашев, П. В. Степанов. – М.: Группа ИТД, 2010. – 470 с.
2. Электромагнитное загрязнение окружающей среды и здоровье населения России / Ю. Г. Григорьев [и др.]; под ред. А. К. Демина. – М.: Изд-во Рос. Ассоциации обществ. здоровья, 1997. – 76 с.
3. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz) / International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection // Health Phys. – 2010. – Vol. 99, № 6. – P. 818–836. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3181f06c86>
4. Moskowitz, J. M. Effects of Exposure to Electromagnetic Fields: Thirty years of research [Electronic resource] / J. M. Moskowitz // Electromagnetic Radiation Safety. – Mode of access: <https://www.saferemr.com/2018/02/effects-of-exposure-to-electromagnetic.html>. – Date of access: 02.05.2023.
5. Стожаров, А. Н. Медицинская экология: учеб. пособие / А. Н. Стожаров. – Минск: Выш. шк., 2007. – 368 с.
6. Магнитные поля на электротранспорте и экология человека / Н. Г. Птицына [и др.]. – СПб.: Нестор-История, 2010. – 120 с.
7. Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats / W. Duan [et al.] // Bioelectromagnetics. – 2014. – Vol. 35. – P. 58–69. <https://doi.org/10.1002/bem.21816>
8. Halgamuge, M. N. Measurement and analysis of electromagnetic fields from trams, trains and hybrid cars / M. N. Halgamuge, C. D. Abeyrathne, P. Mendis // Radiat. Prot. Dosim. – 2010. – Vol. 141, № 3. – P. 255–268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
9. Vedholm, K. Personal Exposure Resulting from Level Low Frequency Electromagnetic Fields in Automobiles: Abstract No. F-9 / K. Vedholm, Y. K. Hamnerius // Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, June 8–13, Bologna, Italy: Abstract book. – 1997. – Vol. 6. – P. 445.
10. Magnetic Shielding for Electric Vehicles: Program Rev. [Electronic resource] // Engineering Matters. – Mode of access: <http://www.engineeringmatters.com/Magnetic%20Shielding%20for%20Electric%20Vehicles.pdf>. – Date of access: 03.07.2023.
11. Electric Cars and Electromagnetic Interference With Cardiac Implantable Electronic Devices: A Cross-sectional Evaluation / C. Lennerz [et al.] // Ann. Intern. Med. – 2018. – Vol. 169, № 5. – P. 350–352. <https://doi.org/10.7326/m17-2930>
12. Мишин, Д. Д. Магнитные материалы / Д. Д. Мишин. – М.: Высш. шк., 1991. – 384 с.
13. Грабчиков, С. С. Материалы электромагнитной и радиационной защиты для изделий электроники / С. С. Грабчиков // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2018. – Т. 63, № 1. – С. 7–14. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-7-14>
14. Шрамков, Е. Г. Электрические и магнитные измерения / Е. Г. Шрамков. – Л.: Из-во НКТП СССР, 1937. – 585 с.

References

1. Kechiev L. N., Akbashev B. B., Stepanov P. V. *Shielding of Technical Facilities and Shielding Systems*. Moscow, Gruppya ITD Publ., 2010. 470 p. (in Russian).
2. Grigor'ev Yu. G. *Electromagnetic Pollution of the Environment and the Health of the Russian Population*. Moscow, Publishing House of the Russian Association of Public Health, 1997. 76 p. (in Russian).
3. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). *Health Physics*, 2010, vol. 99, no. 6, pp. 818–836. <https://doi.org/10.1097/hp.0b013e3181f06c86>

4. Moskowitz J. M. Effects of Exposure to Electromagnetic Fields: Thirty years of research. *Electromagnetic Radiation Safety*. 2024. Available at: <https://www.saferemr.com> (accessed 02 May 2023).
5. Stozharov A. N. *Medical Ecology*. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2007. 368 p. (in Russian).
6. Ptitsyna N. G., Villorezi Dzh., Kopytenko Yu. A., Tyasto M. I. *Magnetic fields on electric vehicles and human ecology*. St. Petersburg, Nestor-Istoriya Publ., 2010. 120 p. (in Russian).
7. Duan W., Liu C., Wu H., Chen C., Zhang T., Gao P., Luo X., Yu Z., Zhou Z. Effects of exposure to extremely low frequency magnetic fields on spermatogenesis in adult rats. *Bioelectromagnetics*, 2014, vol. 35, pp. 58–69. <https://doi.org/10.1002/bem.21816>
8. Halgamuge M. N., Abeyrathne C. D., Mendis P. Measurements performed in electric trains – Comparison with ICNIRP Limit and Laboratory Experiments. Measurements and Analysis of Electromagnetic Fields from Trams, Trains and Hybrid Cars. *Radiation Protection Dosimetry*, 2010, vol. 141, no. 3, pp. 255–268. <https://doi.org/10.1093/rpd/ncq168>
9. Vedholm K., Hamnerius Y. K. Personal Exposure Resulting from Level Low Frequency Electromagnetic Fields in Automobiles. Abstract No. F-9. *Second World Congress for Electricity and Magnetism in Biology and Medicine, June 8–13, 1997*. Bologna, Italy, 1997, vol. 6, p. 445.
10. *Magnetic Shielding for Electric Vehicles: Program Rev.* 16–17 May 1995. Available at: <http://www.engineeringmatters.com/Magnetic%20Shielding%20for%20Electric%20Vehicles.pdf> (accessed 3 July 2023).
11. Lennerz C., O'Connor M., Horlbeck L., Michel J., Weigand S., Grebmer C., Blazek P. [et al.]. Electric cars and electromagnetic interference with cardiac implantable electronic devices: a cross-sectional evaluation. *Annals of Internal Medicine*, 2018, vol. 169, no. 5, pp. 350–352. <https://doi.org/10.7326/M17-2930>
12. Mishin D. D. *Magnetic Materials*. Moscow, Vyshaya shkola Publ., 1991. 384 p. (in Russian).
13. Grabchikov S. S. Materials of electromagnetic and radiation protection for electronic products. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2018, vol. 63, no. 1, pp. 7–14 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2018-63-1-7-14>
14. Shramkov E. G. *Electric and Magnetic Measurements*. Leningrad, Publ. House of the NKTP of the USSR, 1937. 585 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-129-138>
УДК 621.396.98



Оригинальная статья

А. А. Дятко^{*}, С. М. Костромицкий, П. Н. Шумский

*Республиканское научно-производственное унитарное предприятие
«Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси»,
ул. П. Бровки, 15/5, каб. 420, 220072, Минск, Республика Беларусь*

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЫЧИСЛЕНИЯ РАКУРСА ЦЕЛИ В СИСТЕМЕ КООРДИНАТ БОРТОВОЙ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СТАНЦИИ

Аннотация. Разработаны алгоритмы вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции (БРЛС) и выполнено моделирование их работы. Для построения алгоритма вычисления ракурса цели используется неподвижная земная система координат и подвижная система координат БРЛС. Представлены выражения для пересчета декартовых координат объекта из земной системы координат в систему координат бортовой радиолокационной станции. Вводится понятие азимутальной и угломестной плоскости для системы координат БРЛС. Представлены алгоритмы вычисления ракурсов цели в азимутальной и угломестной плоскостях. Показано, что алгоритм вычисления ракурса цели в угломестной плоскости имеет различный вид в зависимости от знака угла места цели. Кроме этого, вид упомянутого алгоритма зависит от того, приближается или удаляется цель от БРЛС. Полученные алгоритмы вычисления ракурса цели используют информацию о координатах скорости цели в системе координат БРЛС. Поскольку координаты вектора скорости в БРЛС не могут быть измерены, то они оцениваются по двум контактам с целью за период обзора. Выполнено моделирование разработанных алгоритмов. Данные алгоритмы могут использоваться при моделировании радиолокационного сигнала, отраженного от движущейся воздушной или наземной цели с учетом ее диаграммы обратного рассеяния.

Ключевые слова: алгоритм, моделирование, система координат, нормализованные координаты, бортовая радиолокационная станция, ракурс цели

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор С. М. Костромицкий.

Информация об авторах: Дятко Александр Аркадьевич* – кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси». E-mail: dyatko_a@tut.by; Костромицкий Сергей Михайлович – член-корреспондент Национальной академии наук Беларуси, доктор технических наук, профессор, директор Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси». E-mail: sleus@abv.bg; Шумский Петр Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заместитель директора по научной работе Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси». E-mail: shumski.petr@yandex.by

Вклад авторов: Дятко Александр Аркадьевич – математическое моделирование алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции и графическое представление результатов; Костромицкий Сергей Михайлович – постановка задачи по разработке алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции, обсуждение результатов исследования, редактирование текста рукописи; Шумский Петр Николаевич – разработка алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции.

Для цитирования: Дятко, А. А. Разработка и моделирование алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции / А. А. Дятко, С. М. Костромицкий, П. Н. Шумский // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 129–138. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-129-138>

Поступила в редакцию: 03.10.2023

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Original article

Alexander A. Dyatko*, Sergei M. Kostromitsky, Petr N. Shumski

*Republican Scientific and Production Unitary Enterprise
“Center of Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”,
15/5, room 420, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus***DEVELOPMENT AND MODELING OF ALGORITHMS FOR CALCULATING TARGET ANGLE IN THE COORDINATE SYSTEM OF THE ONBOARD RADAR**

Abstract. The article is devoted to the development of algorithms for calculating the target angle in the coordinate system of an onboard radar and modeling their operation. To construct an algorithm for calculating the target angle, a fixed terrestrial coordinate system and a moving coordinate system of an onboard radar are used. Expressions are presented for recalculating the Cartesian coordinates of an object from the earth coordinate system to the on-board radar coordinate system. The concept of azimuth and elevation planes is introduced for the coordinate system of an onboard radar. Algorithms for calculating target angles in the azimuthal and elevation planes are presented. It is shown that the algorithm for calculating the target angle in the elevation plane has a different form depending on the sign of the target elevation angle. In addition, the type of the mentioned algorithm depends on whether the target is approaching or moving away from the onboard radar. The resulting algorithms for calculating the target angle use information about the coordinates of the target speed in the coordinate system of the onboard radar. Since the coordinates of the velocity vector in the onboard radar cannot be measured, they are estimated from two contacts with the target during the review period. Modeling of the developed algorithms has been carried out.

Keywords: algorithm, modeling, coordinate system, normalized coordinates, onboard radar, target view

Conflict of interest: the author’s team includes the member of the Editorial Board Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor Sergei M. Kostromitsky.

Information about the authors: *Alexander A. Dyatko** – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher at Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus”. E-mail: dyatko_a@tut.by; *Sergei M. Kostromitsky* – Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Director at Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Center of Radio Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus”. E-mail: sleus@abv.bg; *Petr N. Shumski* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy Director at Republican Scientific and Production Unitary Enterprise “Radio Engineering Center of the National Academy of Sciences of Belarus”. E-mail: shumski.petr@yandex.by

Contribution of the authors: *Alexander A. Dyatko* – mathematical modeling of algorithms for calculating the target angle in the onboard radar coordinate system and graphical presentation of the results; *Sergei M. Kostromitsky* – formulation of the problem of developing algorithms for calculating the target angle in the coordinate system of the onboard radar, discussion of the research results, editing the text of the manuscript; *Petr N. Shumski* – development of algorithms for calculating the target angle in the onboard radar coordinate system.

For citation: Dyatko A. A., Kostromitsky S. M., Shumski P. N. Development and modeling of algorithms for calculating target angle in the coordinate system of the onboard radar. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 129–138 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-129-138>

Received: 03.10.2023

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. В настоящее время при разработке и модернизации радиолокационных систем важное место отводится детальному математическому моделированию их работы по имитированным отраженным сигналам от заданных типов объектов. При этом необходимо обеспечить достоверность воспроизведения особенностей отраженных от объектов сигналов, содержащихся в законах изменения их амплитуд и фаз [1, 2].

Одной из причин изменения комплексных амплитуд отраженного сигнала является изменение ракурса, то есть угловой ориентации объекта относительно радиолокатора [3–5]. Поэтому при имитации радиолокационных сигналов, отраженных от движущихся воздушных или наземных объектов, возникает необходимость в знании ракурса объекта [6]. Наличие этой информации позволяет проводить имитацию комплексных амплитуд отраженных сигналов с учетом известной зависимости диаграммы обратного рассеяния объекта от углов его ориентации.

В некоторых публикациях (например, [7]) рассматривается решение задачи определения ракурса движущегося летательного аппарата (самолета, ракеты) с помощью размещенного на поверхности Земли неподвижного радиолокатора. Данная проблема является актуальной при моделировании отраженных сигналов не только для наземного радиолокатора, но и для бортового, размещенного на движущемся самолете. В последнем случае решение задачи определения

ракурса движущейся цели усложняется необходимостью учета движения не только цели, но и носителя бортового радиолокатора. Если пренебречь значениями углов скольжения и сноса, а также рысканиями цели и носителя бортового радиолокатора, то, имея информацию о законах перемещения центров масс цели и носителя бортового радиолокатора, можно выполнить оценку ракурса цели относительно бортового радиолокатора и сформировать отраженный сигнал с необходимой комплексной амплитудой. Влияние на амплитуду и фазу отраженного сигнала углов скольжения и сноса, а также рысканий цели и носителя бортового радиолокатора может быть учтено дополнительно.

Таким образом, определение ракурса цели радиолокатором, размещенным на движущемся самолете, является весьма актуальной задачей, поскольку известные авторам исследования по рассматриваемой тематике проводились только для неподвижных радиолокационных систем, размещенных на земной поверхности.

Цель исследования – разработка алгоритмов вычисления ракурса движущейся цели в системе координат бортовой радиолокационной станции и проверка их работы методом моделирования.

Системы координат. Пусть в земной декартовой системе координат (СК) $O_g X_g Y_g Z_g$ по произвольной траектории движется летательный аппарат (ЛА) – носитель БРЛС и воздушная цель (рис. 1). Далее пусть $\vec{R}_g^f = \vec{R}_g^f(x_g^f, y_g^f, z_g^f)$ – радиус-вектор текущего положения носителя БРЛС в земной декартовой СК; $\vec{V}_g^f = \vec{V}_g^f(V_{gm}^f, \beta_{V_g}^f, \varepsilon_{V_g}^f)$ – вектор скорости носителя БРЛС в земной сферической СК, где $V_{gm}^f = |\vec{V}_g^f|$ – модуль вектора скорости, $(\beta_{V_g}^f, \varepsilon_{V_g}^f)$ – соответственно азимут и угол места вектора скорости; $\vec{V}_{g_cs}^f = \vec{V}_{g_cs}^f(V_{gx}^f, V_{gy}^f, V_{gz}^f)$ – вектор скорости носителя БРЛС в земной декартовой СК; $\vec{R}_g^t = \vec{R}_g^t(x_g^t, y_g^t, z_g^t)$ – радиус-вектор текущего положения цели в земной декартовой СК.

При этом, как принято в радиолокации, значения азимута β_g в земной СК отсчитывается в азимутальной плоскости $O_g X_g Z_g$ от координатной оси $O_g X_g$ по часовой стрелке ($0 \leq \beta_g < 2\pi$). Значение угла места ε_g отсчитывается от координатной плоскости $O_g X_g Z_g$ ($0 \leq \varepsilon_g \leq \pi/2$).

Представим, что $OXYZ$ – система координат БРЛС, центр которой совпадает с центром масс ЛА, а ось OX направлена по его строительной оси (рис. 1, 2). В СК БРЛС, сохраняя принятую в радиолокации терминологию, в качестве азимутальной плоскости используем координатную плоскость OXZ . Значение азимута β отсчитывается от координатной оси OX по часовой стрелке ($0 \leq \beta < 2\pi$). Значение угла места ε отсчитывается от координатной плоскости OXZ ($-\pi/2 \leq \varepsilon \leq \pi/2$).

Пусть $\vec{R}^t = \vec{R}^t(x^t, y^t, z^t) = \vec{R}^t(R_m^t, \beta^t, \varepsilon^t)$ – радиус-вектор текущего положения цели соответственно в декартовой и сферической системах координат БРЛС (рис. 1), где $R_m^t = |\vec{R}^t|$ – дальность до цели, (β^t, ε^t) – азимут и угол места цели; $\vec{V}^t = \vec{V}^t(V_m^t, \beta_V^t, \varepsilon_V^t)$ – вектор скорости цели в сферической СК БРЛС, при этом $V_m^t = |\vec{V}^t|$ – модуль вектора скорости, $(\beta_V^t, \varepsilon_V^t)$ – соответственно азимут и угол места вектора скорости.

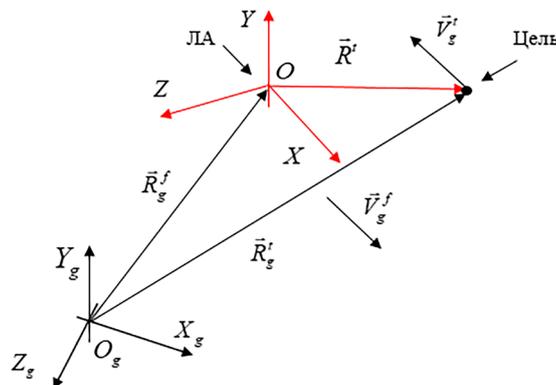


Рис. 1. Взаимное положение носителя бортовой радиолокационной станции и цели в земной системе координат $O_g X_g Y_g Z_g$

Fig. 1. Mutual position of the radar carrier and the target in the earth coordinate system $O_g X_g Y_g Z_g$



Рис. 2. Положение системы координат бортовой радиолокационной станции относительно летательного аппарата [10]

Fig. 2. The position of the radar coordinate system relative to the aircraft [10]

Взаимосвязь координат объектов в земной системе координат и системе координат бортовой радиолокационной станции. При моделировании процесса вычисления ракурсов координаты носителя БРЛС, его вектора скорости, а также координаты цели определяются в неподвижной земной СК $O_g X_g Y_g Z_g$. Измерение же координат цели производится в подвижной СК БРЛС, положение которой в пространстве определяется положением носителя. Отсюда следует необходимость преобразования координат объекта, заданных в земной СК $O_g X_g Y_g Z_g$ при переходе к СК БРЛС $OXYZ$. Для вычисления координат этого объекта (в рассматриваемом случае это наблюдаемая цель) в СК БРЛС $OXYZ$ (см. рис. 1) над земной СК $O_g X_g Y_g Z_g$ необходимо выполнить ряд последовательных преобразований (аффинные преобразования, см. [8]), в результате которых она совмещается с СК БРЛС. В результате значения координат объекта в преобразованной системе координат будут совпадать с их значениями в СК БРЛС.

Выполнив приведенные выше преобразования, можно получить значения заданных в земной СК декартовых координат цели в СК БРЛС. Эти значения будут определяться выражением

$$P1^t = R_2^S R_1^S T_1^S P1_g^t = M_{g_БРЛС} P1_g^t,$$

где $P1^t = (x^t \ y^t \ z^t \ 1)^T = (P^t \ 1)^T$ – нормализованные [8] декартовы координаты цели в СК БРЛС $OXYZ$, $P^t = (x^t \ y^t \ z^t)^T$ – декартовы координаты цели в СК БРЛС, $P1_g^t = (x_g^t \ y_g^t \ z_g^t \ 1)^T = (P_g^t \ 1)^T$ – нормализованные декартовы координаты цели в СК $O_g X_g Y_g Z_g$, $P_g^t = (x_g^t \ y_g^t \ z_g^t)^T$ – декартовы координаты цели в земной системе координат, $M_{g_БРЛС} = R_2^S R_1^S T_1^S$ – матрица для пересчета нормализованных декартовых координат объекта из земной СК $O_g X_g Y_g Z_g$ в СК БРЛС, $T_1^S = T_1^S(x_g^f, y_g^f, z_g^f) =$

$$T_1^S = T_1^S(x_g^f, y_g^f, z_g^f) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -x_g^f \\ 0 & 1 & 0 & -y_g^f \\ 0 & 0 & 1 & -z_g^f \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

$$R_1^S = R_1^S(\beta_{Vg}^f) = \begin{pmatrix} \cos \beta_{Vg}^f & 0 & \sin \beta_{Vg}^f & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \beta_{Vg}^f & 0 & \cos \beta_{Vg}^f & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad R_2^S = R_2^S(\varepsilon_{Vg}^f) = \begin{pmatrix} \cos \varepsilon_{Vg}^f & \sin \varepsilon_{Vg}^f & 0 & 0 \\ -\sin \varepsilon_{Vg}^f & \cos \varepsilon_{Vg}^f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Азимут и угол места цели в СК БРЛС вычисляются в соответствии с выражениями [9]:

$$\beta^t = \operatorname{arctg}\left(\frac{z^t}{x^t}\right) + \frac{\pi}{2}\left[2 - \operatorname{sgn}(z^t) - \operatorname{sgn}(z^t)\operatorname{sgn}(x^t)\right],$$

$$\varepsilon^t = \operatorname{arctg}\left(\frac{y^t}{\sqrt{(x^t)^2 + (z^t)^2}}\right),$$

где $\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ -1, & x < 0 \end{cases}$.

Алгоритм вычисления ракурса цели в азимутальной плоскости системы координат бортовой радиолокационной станции. Пусть $S^t = S^t(S_{ms}^t, \beta_S^t, \varepsilon_S^t) = -\bar{R}^t(R_m^t, \beta^t, \varepsilon^t)$ – вектор в СК БРЛС, направленный от цели к началу системы координат, где, $S_{ms}^t = R_m^t$, а параметры $(\beta_S^t, \varepsilon_S^t)$ однозначно определяются через (β^t, ε^t) .

Ракурс цели $\Delta\beta^t$ в азимутальной плоскости СК БРЛС OXZ вычисляется следующим образом:

$$\Delta\beta^t = \begin{cases} \beta_V^t - \beta_S^t & \text{при } \beta_V^t - \beta_S^t \geq 0 \\ 2\pi + (\beta_V^t - \beta_S^t) & \text{при } \beta_V^t - \beta_S^t < 0 \end{cases}. \quad (1)$$

При этом значение ракурса отсчитывается от направления, определяемого вектором \vec{V}_{ZX}^t (проекция вектора \vec{V}^t на азимутальную плоскость OXZ), против часовой стрелки.

На рис. 3 показаны ракурсы цели в азимутальной плоскости при ее различной ориентации в пространстве, где \vec{S}_{ZX}^t – проекция вектора \vec{S}^t на азимутальную плоскость OXZ .

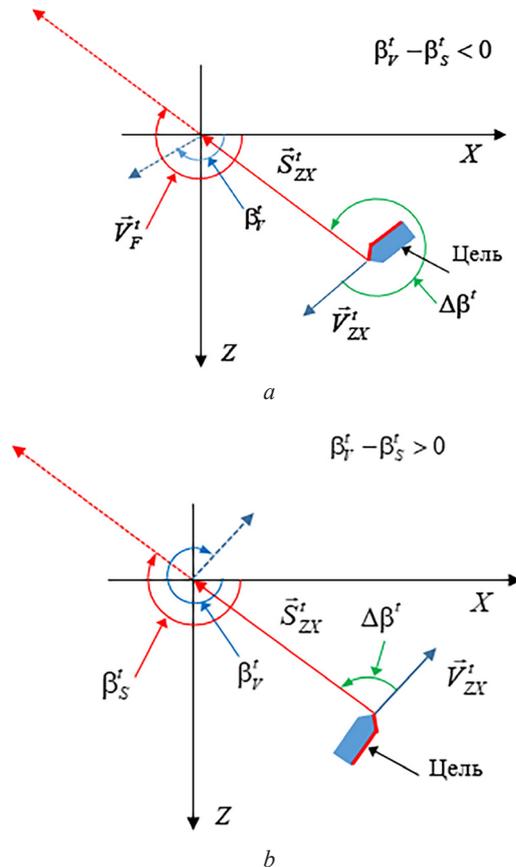


Рис. 3. Ракурс цели в азимутальной плоскости: *a* – для случая $\beta_V^t - \beta_S^t < 0$, *b* – для случая $\beta_V^t - \beta_S^t > 0$
 Fig. 3. Target view in the azimuthal plane: *a* – for the case $\beta_V^t - \beta_S^t < 0$, *b* – for the case $\beta_V^t - \beta_S^t > 0$

Алгоритм вычисления ракурса цели в угломестной плоскости системы координат бортовой радиолокационной станции. В качестве угломестной плоскости положим плоскость F , определяемую векторами \vec{S}^t и $O\vec{Y}$ (рис. 4). Вектор скорости цели \vec{V}^t может как лежать в данной плоскости, так и не принадлежать ей. В нашем случае будем рассматривать проекцию \vec{V}_F^t вектора \vec{V}^t на плоскость F (см. рис. 4).

Отдельно рассмотрим два случая положения цели относительно горизонтальной плоскости OXZ : 1) цель выше или в плоскости OXZ ($\varepsilon^t \geq 0$); 2) цель ниже плоскости OXZ ($\varepsilon^t < 0$).

Алгоритм вычисления ракурса цели $\Delta\varepsilon^t$ в угломестной плоскости для первого случая ($\varepsilon^t \geq 0$) следующий:

- 1) вычислить скалярное произведение векторов \vec{S}^t и \vec{V}^t :

$$q = \vec{S}^t \cdot \vec{V}^t;$$

2) если $q \geq 0$ (угол между векторами \vec{S}^t и \vec{V}^t острый или 90° , цель приближается к радиолокационной станции или остается на неизменном расстоянии от нее), то ракурс определяется согласно выражению

$$\Delta\varepsilon^t = \varepsilon_V^t - \varepsilon_S^t; \quad (2)$$

3) если $q < 0$ (угол между векторами \vec{S}^t и \vec{V}^t тупой, цель удаляется от радиолокационной станции), то ракурс рассчитывается следующим образом:

$$\Delta\varepsilon^t = \pi - (\varepsilon_V^t - \varepsilon_S^t). \quad (3)$$

Приведенное описание алгоритма для первого случая иллюстрируется рис. 5, где векторы \vec{V}^t и \vec{S}^t лежат в одной плоскости OYX (плоскость F). При этом положение цели 1 соответствует приближению к БРЛС, а положение 2 – удалению от БРЛС. Положительное значение ракурса отсчитывается от направления, определяемого вектором \vec{V}^t в сторону азимутальной плоскости OXZ ; отрицательное значение ракурса – от направления, определяемого вектором \vec{V}^t в сторону от азимутальной плоскости OXZ .

Алгоритм вычисления ракурса цели $\Delta\varepsilon^t$ в угломестной плоскости F для второго случая ($\varepsilon^t < 0$):

- 1) вычислить скалярное произведение векторов \vec{S}^t и \vec{V}^t :

$$q = \vec{S}^t \cdot \vec{V}^t;$$

2) если $q \geq 0$ (угол между векторами \vec{S}^t и \vec{V}^t острый или 90° , цель приближается к радиолокационной станции или остается на неизменном расстоянии от нее), то ракурс определяется согласно выражению

$$\Delta\varepsilon^t = \varepsilon_V^t - \varepsilon_S^t; \quad (4)$$

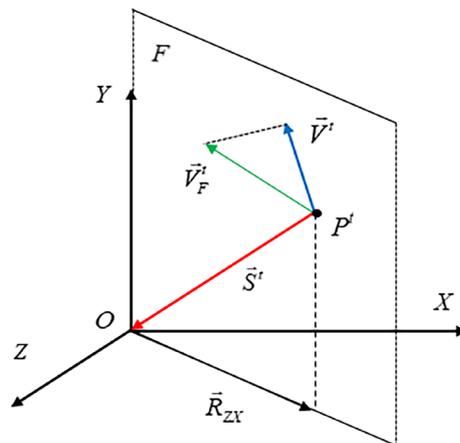


Рис. 4. Угломестная плоскость F в системе координат бортовой радиолокационной станции

Fig. 4. Elevation plane F in the radar coordinate system

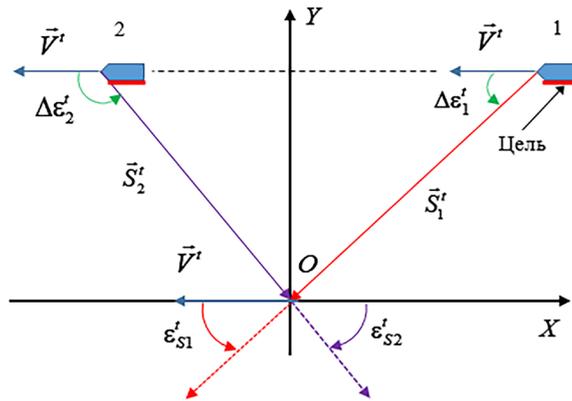


Рис. 5. Ракурс цели в случае приближения и удаления цели от бортовой радиолокационной станции при $\epsilon^t \geq 0$
 Fig. 5. Target angle in case of approach and removal of the target from the radar for $\epsilon^t \geq 0$

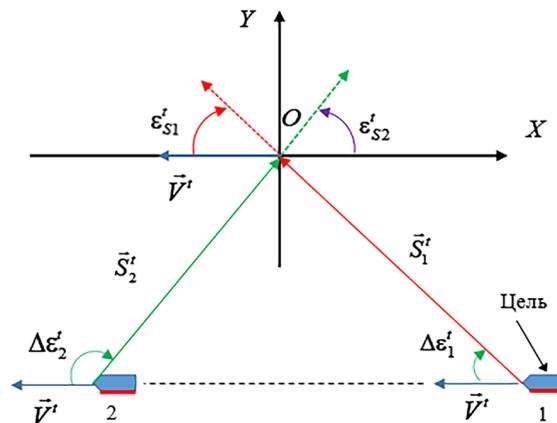


Рис. 6. Ракурс цели в случае приближения и удаления цели от бортовой радиолокационной станции при $\epsilon^t < 0$
 Fig. 6. Target angle in case of approach and removal of the target from the radar for $\epsilon^t < 0$

3) если $q < 0$ (угол между векторами \vec{S}^t и \vec{V}^t тупой, цель удаляется от радиолокационной станции), то ракурс рассчитывается следующим образом:

$$\Delta\epsilon^t = -\left[\pi + (\epsilon_V^t - \epsilon_S^t)\right]. \quad (5)$$

Приведенное описание алгоритма для второго случая иллюстрируется рис. 6, где векторы \vec{V}^t и \vec{S}^t лежат в одной плоскости OYX (плоскость F). При этом положение цели 1 соответствует приближению к БРЛС, а положение 2 – удалению от БРЛС. При этом отрицательное значение ракурса отсчитывается от направления, определяемого вектором \vec{V}^t в сторону азимутальной плоскости OXZ ; положительное значение ракурса – от направления, определяемого вектором \vec{V}^t в сторону от азимутальной плоскости OXZ .

Вычисление вектора скорости цели в системе координат бортовой радиолокационной станции. Как видно из выражений (1)–(5), для вычисления ракурса цели необходимо знать сферические координаты вектора скорости цели в СК БРЛС. Их значения будем вычислять по двум последовательным контактам с целью.

Пусть для некоторого момента времени t_i получены декартовы координаты цели $P_i^t = (x_i^t \ y_i^t \ z_i^t)^T$ в СК БРЛС $(OXYZ)_i$, где $(OXYZ)_i$ – положение СК БРЛС в земной СК в момент времени t_i . Соответственно для момента времени t_{i+1} имеем декартовы координаты цели $P_{i+1}^t = (x_{i+1}^t \ y_{i+1}^t \ z_{i+1}^t)^T$ в СК БРЛС $(OXYZ)_{i+1}$, где $(OXYZ)_{i+1}$ – положение СК БРЛС в земной СК в момент времени t_{i+1} . При этом $T_r = t_{i+1} - t_i$ – период обзора БРЛС.

Поскольку измерение координат цели производится в различных системах координат, то пересчитаем координаты цели из СК $(OXYZ)_i$ в СК $(OXYZ)_{i+1}$.

Пусть $\Delta\vec{R}_g^f = \Delta\vec{R}_g^f(\Delta R_{gx}^f, \Delta R_{gy}^f, \Delta R_{gz}^f) = \vec{R}_{g,i+1}^f - \vec{R}_{g,i}^f = \vec{V}_{g_cs}^f T_r$ – вектор смещения носителя БРЛС в земной СК за время, равное периоду обзора БРЛС, где $\Delta R_g^f = (\Delta R_{gx}^f \ \Delta R_{gy}^f \ \Delta R_{gz}^f)^T = (V_{gx}^f \ V_{gy}^f \ V_{gz}^f)^T T_r$ – декартовы координаты вектора смещения. Тогда нормализованные координаты вектора смещения в СК БРЛС будут иметь вид: $\Delta R1_g^f = R_2^S R_1^S \Delta R1_g^f = M_{gV_БРЛС} \Delta R1_g^f$, где $M_{gV_БРЛС} = R_2^S R_1^S$ – матрица пересчета нормализованных координат вектора из земной СК в СК БРЛС, $\Delta R1_g^f = (\Delta R_g^f \ 1)^T$, $\Delta R1^f = (\Delta R^f \ 1)^T$ и $\Delta R^f = (\Delta R_x^f \ \Delta R_y^f \ \Delta R_z^f)^T$.

Нормализованные координаты цели, измеренные в СК $(OXYZ)_i$ и пересчитанные в СК $(OXYZ)_{i+1}$, определяются выражением $W1^t = T_1^S (\Delta R_x^f, \Delta R_y^f, \Delta R_z^f) P1_i^t = (W^t \ 1)^T$, где $W^t = (x_w^t \ y_w^t \ z_w^t)^T$.

Значения координат вектора скорости цели в декартовой СК БРЛС, полученных по результатам измерений ее координат, вычисляются следующим образом:

$$\hat{V}_{cs}^t = (\hat{V}_x^t \ \hat{V}_y^t \ \hat{V}_z^t)^T = \frac{P_{i+1}^t - W^t}{T_r} = \frac{1}{T_r} (x_{i+1}^t - x_w^t \ y_{i+1}^t - y_w^t \ z_{i+1}^t - z_w^t)^T.$$

Азимут и угол места вектора скорости цели в СК БРЛС по результатам измерений определяются из выражений [9]:

$$\hat{\beta}_V^t = \arctg\left(\frac{\hat{V}_z^t}{\hat{V}_x^t}\right) + \frac{\pi}{2} \left[2 - \text{sgn}(\hat{V}_z^t) - \text{sgn}(\hat{V}_x^t) \text{sgn}(\hat{V}_y^t) \right],$$

$$\hat{\varepsilon}_V^t = \arctg\left(\frac{\hat{V}_y^t}{\sqrt{(\hat{V}_x^t)^2 + (\hat{V}_z^t)^2}}\right).$$

Моделирование алгоритмов вычисления ракурса цели в системе координат бортовой радиолокационной станции. Анализируемые в настоящей статье алгоритмы оценки ракурса цели в азимутальной и угломестной плоскостях СК БРЛС были смоделированы в пакете Mathcad.

Рассматривались два случая. В первом случае цель движется в плоскости OXY СК БРЛС ($z^t = 0$) по прямолинейной траектории с параметрами вектора скорости: азимут $\beta_V^t = 180^\circ$; угол места $\varepsilon_V^t = 0^\circ$. Угол места цели $\varepsilon^t > 0$. Описанная схема движения цели соответствует рис. 5. Во втором случае изменен только угол места цели, который установлен отрицательным, $\varepsilon^t < 0$. Схема движения цели соответствует рис. 6. Ракурсы вычислялись с временным интервалом, равным периоду обзора БРЛС.

Результаты представлены на рис. 7, 8, где k – номер временного отсчета. На рис. 7 и 8, *a* показаны зависимости ракурсов цели от времени для первого случая соответственно в азимутальной и угломестной плоскостях СК БРЛС. На рис. 8, *b* представлена временная зависимость ракурса цели в угломестной плоскости для второго случая.

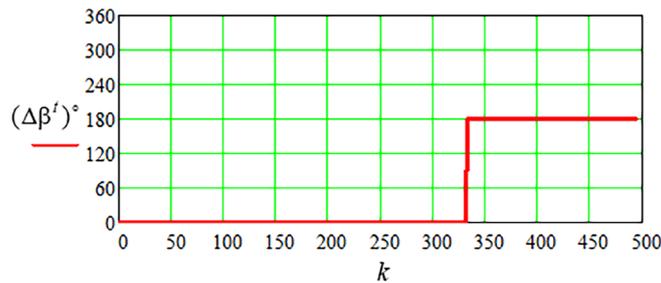


Рис. 7. Изменение ракурса цели в азимутальной плоскости системы координат бортовой радиолокационной станции при ее движении по прямолинейной траектории

Fig. 7. Changing the target's angle in the azimuthal plane of the radar system when it moves along a straight path

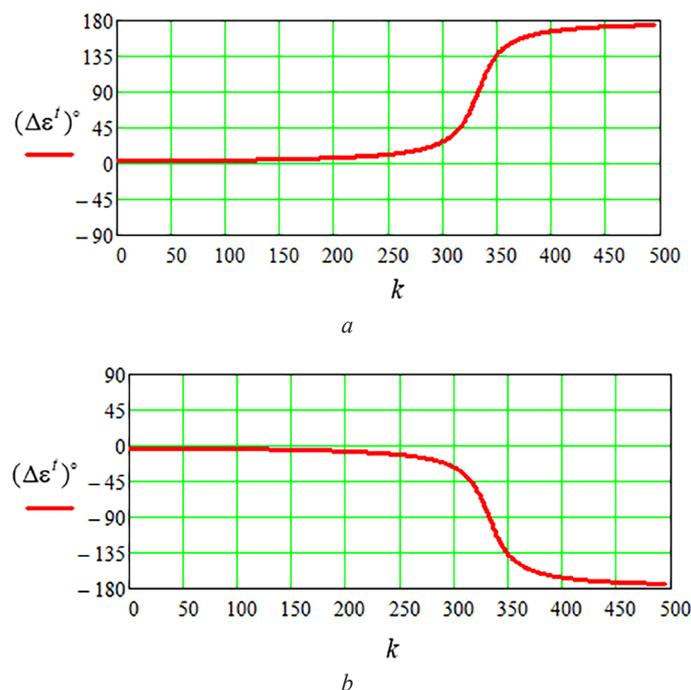


Рис. 8. Изменение ракурса цели в угломестной плоскости системы координат бортовой радиолокационной станции при ее движении по прямолинейной траектории: $a - \varepsilon^t > 0$, $b - \varepsilon^t < 0$

Fig. 8. Changing the target's angle in the elevation plane of the radar system when it moves along a straight path: $a - \varepsilon^t > 0$, $b - \varepsilon^t < 0$

Заклучение. В работе представлены алгоритмы вычисления ракурса цели в азимутальной и угломестной плоскостях системы координат БРЛС. Выполнено моделирование работы полученных алгоритмов. При моделировании рассмотрены случаи, когда цель находится выше ($\varepsilon^t > 0$) и ниже ($\varepsilon^t < 0$) носителя бортовой радиолокационной станции.

Результаты моделирования иллюстрируют поведение ракурса цели во времени в азимутальной и угломестной плоскостях системы координат БРЛС при ее движении по заданной линейной траектории.

Разработанные авторами алгоритмы могут найти применение при моделировании радиолокационного сигнала, отраженного от движущейся воздушной или наземной цели с учетом ее диаграммы обратного рассеяния.

Список использованных источников

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория: справочник / под ред. Я. Д. Ширмана. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
2. Радиолокационные характеристики объектов: методы исследования / А. С. Грибков [и др.]; под ред. С. М. Несерова. – М.: Радиотехника, 2015. – 312 с.
3. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами / О. И. Сухаревский [и др.]; под ред. О. И. Сухаревского. – Харьков: ХУПС, 2009. – 468 с.
4. Слюсарь, Н. М. Рассеяние и вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами / Н. М. Слюсарь. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2015. – 288 с.
5. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба / А. Е. Охрименко. – М.: Воен. изд-во, 1983. – Ч. 1: Основы радиолокации. – 456 с.
6. Моделирование в радиолокации / А. И. Леонов [и др.]; под ред. А. И. Леонова. – М.: Совет. радио, 1979. – 264 с.
7. Маркович, О. С. Метод определения ракурса воздушной цели по результатам обработки траекторных измерений / О. С. Маркович, А. В. Машкин, Г. В. Сенчаков // Радиотехника. – 2004. – № 5. – С. 37–39.
8. Шикин, Е. В. Компьютерная графика. Динамика, реалистические изображения / Е. В. Шикин, А. В. Боресков. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 1996. – 288 с.
9. Ширман, Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
10. Системы координат, применяемые в динамике полета [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://studfile.net/preview/7418563/>

References

1. Shirman Ya. D. (ed.). *Radio-Electronic Systems: Fundamentals of Construction and Theory*. 2nd ed. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 512 p. (in Russian).
2. Gribkov A. S., Gribkov V. S., Gromov A. N., Kirillov A. P., Kovalev S. V., Moryakov S. I., Nesterov S. M. [et al.] *Radar Characteristics of Objects: Research Methods*. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 312 p. (in Russian).
3. Sukharevskii O. I., Vasilets V. A., Kukobko S. V., Nechitailo S. V., Sazonov A. Z. *Scattering of Electromagnetic Waves by Air and Ground Radar Objects*. Khar'kov, Ivan Kozhedub National Air Force University Publ., 2009. 468 p. (in Russian).
4. Slyusar' N. M. *Scattering and Secondary Modulation of Radar Signals by Dynamic Objects*. Minsk, Military Academy of the Republic of Belarus Publ., 2015. 288 p. (in Russian).
5. Okhrimenko A. Ye. *Fundamentals of Radar and Electronic Warfare. Part I: Basics of Radar*. Moscow, Military Publ. House, 1983. 456 p. (in Russian)
6. Leonov A. I., Vasenev V. N., Gaydukov Yu. I., Danileiko A. A., Dvornikov F. A., Kononeiko G. V., Iagulviko F. V. [et al.]. *Modeling in Radar*. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1979. 264 p. (in Russian).
7. Markovich O. S., Mashkin A. V., Senchakov G. V. Method for determining the angle of an air target based on the results of processing trajectory measurements. *Radiotekhnika =Radioengineering*, 2004, no. 5, pp. 37–39 (in Russian).
8. Shikin E. V., Boreskov A. V. *Computer Graphics: Dynamics, Realistic Images*. Moscow, DIALOG-MIFI Publ., 1996. 288 p. (in Russian).
9. Shirman Ya. D., Manjos V. N. *Theory and Technique of Processing Radar Information Against the Background of Interference*. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1981. 416 p. (in Russian).
10. *Coordinate systems used in flight dynamics*. Available at: <https://studfile.net/preview/7418563/>

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

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-139-150>
УДК 621.382.2.3-046.47



Оригинальная статья

Г. А. Пискун^{1*}, В. Ф. Алексеев¹, О. В. Степченко²,
А. Н. Попов², А. Н. Беликов¹, Д. Г. Рыбаков¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, 220013, Минск, Республика Беларусь

²Открытое акционерное общество

«Научно-исследовательский институт электронных вычислительных машин»,
ул. Богдановича, 155, 220040, Минск, Республика Беларусь

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЛИНЫ И КОЛИЧЕСТВА ТЕПЛОВЫХ ТРУБОК НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОТВЕДЕНИЯ ИЗБЫТОЧНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ПРОЦЕССОРА

Аннотация. Представлены результаты изучения влияния длины и количества тепловых трубок (ТТ), входящих в состав радиаторной конструкции, на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от современных процессоров. Проведены исследования для радиаторных конструкций, состоящих из теплосъемной пластины, тепловой трубки и теплообменника (ребристого радиатора), установленных на процессор и находящихся в открытой среде (движение воздуха происходит без перемешивания, что характерно для свободной конвекции) или в замкнутой среде (происходит циркуляция потоков воздуха в замкнутом контуре, что свойственно для естественной конвекции в ограниченном пространстве). Численное моделирование осуществлялось посредством модуля Flow Simulation программного комплекса SolidWorks. Показано, что от естественного движения потоков воздуха в открытой или замкнутой среде значительно зависит значение разности температур, сформированных на концах ТТ. Установлено, что с увеличением длины трубок от 100 до 500 мм происходит увеличение разности температур как в случае движения потоков воздуха в открытой среде, так и в замкнутой. В частности, увеличение разности температур на концах одной ТТ диаметром 6 мм при мощности процессора 50 Вт составило 29,54 °С (открытая среда) и 47,14 °С (замкнутая среда); для трех ТТ – 9,13 °С (открытая среда) и 16,28 °С (замкнутая среда); для пяти ТТ – 5,24 °С (открытая среда) и 10,11 °С (замкнутая среда). Установлено, что увеличение количества трубок диаметром 6 мм и длиной 500 мм от 1 до 5 шт. приводит к снижению разности температур, в частности, при мощности процессора 50 Вт разность температур составила 36,17 °С (одна ТТ в открытой среде) и 55,59 °С (одна ТТ в замкнутой среде); 11,04 °С (три ТТ в открытой среде) и 19,06 °С (три ТТ в замкнутой среде); а также 6,3 °С (пять ТТ в открытой среде) и 11,56 °С (пять ТТ в замкнутой среде). Полученные результаты могут быть использованы для модернизации систем охлаждения различных технических средств, построенных на базе процессоров, а также проектировании новой высокопроизводительной аппаратуры с учетом использования тепловых трубок.

Ключевые слова: процессор, тепловые трубки, теплопроводность, теплообмен, эффективность охлаждения

Благодарности: работа выполнена в рамках договора № 23-1051 на выполнение научно-исследовательской работы на тему «Моделирование тепловых процессов в безвентиляторных ПЭВМ и разработка рекомендаций по оптимизации их конструкции» (№ гос. рег. 20231182 от 13.07.2023).

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Пискун Геннадий Адамович* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: piskun@bsuir.by; Алексеев Виктор Федорович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: v.alekseev@bsuir.by; Степченко Олег Витальевич – директор

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт электронных вычислительных машин» (ОАО «НИИЭВМ»). E-mail: orion@niiev.by; Попов Александр Николаевич – ученый секретарь открытого акционерного общества «Научно-исследовательский институт электронных вычислительных машин» (ОАО «НИИЭВМ»). E-mail: apr@niiev.by; Беликов Андрей Николаевич – студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: andrech1406@gmail.com; Рыбаков Дмитрий Григорьевич – студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: dmitry_ryb10@mail.ru

Вклад авторов: Пискун Геннадий Адамович – анализ эффективности отведения тепла от процессора для каждой рассматриваемой радиаторной конструкции, формирование структуры статьи; Алексеев Виктор Федорович – руководство исследованием по оценке влияния длины и количества тепловых трубок на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от процессора, анализ корректности моделирования, редактирование текста статьи; Степченко Олег Витальевич – постановка задачи исследования, планирование экспериментов и обсуждение полученных результатов; Попов Александр Николаевич – идея разработки трехмерных моделей, анализ результатов моделирования; Беликов Андрей Николаевич – моделирование радиаторных конструкций для оценки влияния длины и количества тепловых трубок на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от процессора; Рыбаков Дмитрий Григорьевич – построение моделей радиаторных конструкций, подготовка материалов к публикации.

Для цитирования: Оценка влияния длины и количества тепловых трубок на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от процессора / Г. А. Пискун [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2 – С. 139–150. <https://doi.org/10.29235/1561-2430-2024-69-2-139-150>

Поступила в редакцию: 15.11.2023

После доработки: 26.12.2023

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Original article

Gennady A. Piskun^{1*}, Victor F. Alexeev¹, Aleh V. Stsepchankou², Aleksandr N. Popov²,
Andrey N. Belikov¹, Dzmitry G. Rybakov¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6, P. Brovka Str., 220013, Minsk, Republic of Belarus

²Open Joint-Stock Company “Scientific Research Institute of Electronic Computers”,
155, Bogdanovich Str., 220040, Minsk, Republic of Belarus

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF THE LENGTH AND NUMBER OF HEAT PIPES ON THE EFFICIENCY OF THE REMOVAL OF EXCESS THERMAL ENERGY FROM THE PROCESSOR

Abstract. The results of a study of the influence of the length and number of heat pipes included in the radiator construction on the efficiency of removing excess thermal energy from modern processors are presented. Research was carried out for radiator constructions consisting of a heat sink, a heat pipe and a finned radiator installed on the processor and located in an open environment (air movement occurs without mixing, which is typical for free convection) or in a closed environment (air flows circulate in a closed loop, which is typical for natural convection in a limited space). Numerical modeling was carried out using the Flow Simulation module of the SolidWorks software package. It has been shown that the value of the temperature difference formed at the ends of heat pipes (hereinafter referred to as HP) significantly depends on the natural movement of air flows in an open or closed environment. It has been established that with an increase in the length of the HP from 100 mm to 500 mm, the temperature difference increases both in the case of air flow in an open environment and in a closed environment, in particular, the temperature difference increase at the ends of one HP with a diameter of 6 mm at power 50 W processor will be 29.54 °C (open environment) and 47.14 °C (closed environment); for three HPs – 9.13 °C (open environment) and 16.28 °C (closed environment); for five HPs – 5.24 °C (open environment) and 10.11 °C (closed environment). It has been established that an increase in the number of HPs with a diameter of 6 mm and a length of 500 mm from 1 pc. up to 5 pcs. leads to a decrease in temperature difference, in particular, with a processor power of 50 W, the temperature difference will be 36.17 °C (one HP in an open environment) and 55.59 °C (one HP in a closed environment); 11.04 °C (three HPs in an open environment) and 19.06 °C (three HPs in a closed environment); as well as 6.3 °C (five HPs in an open environment) and 11.56 °C (five HPs in a closed environment). The results obtained can be used to modernize the cooling systems of various technical devices based on processors, as well as to design new high-performance equipment taking into account the use of heat pipes.

Keywords: processor, heat pipes, thermal conductivity, heat transfer, cooling efficiency

Acknowledgements: the work was performed under contract no. 23-1051 for research work on the topic “Modeling of thermal processes in fanless PCs and development of recommendations for optimizing their design” (State reg. no. 20231182 dated 13.07.2023).

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

Information about the authors: Gennady A. Piskun* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Design Information and Computer Systems at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: piskun@bsuir.by; Victor F. Alexeev – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate

Professor of the Department of Design Information and Computer Systems at Belarusian State University of informatics and Radioelectronics. E-mail: v.alekseev@bsuir.by; *Oleg V. Stepchenkov* – Director at Open Joint-Stock Company “Scientific Research Institute of Electronic Computers”. E-mail: orion@niievm.by; *Aleksander N. Popov* – Scientific Secretary at Open Joint-Stock Company “Scientific Research Institute of Electronic Computers”. E-mail: anp@niievm.by; *Andrey N. Belikov* – Student at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: andrech1406@gmail.com; *Dmitry G. Rybakov* – Student at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: dmitry_ryb10@mail.ru

Contribution of the authors: *Gennady A. Piskun* – analysis of the efficiency of heat removal from the processor for each considered radiator construction, formation of the structure of the article; *Victor F. Alexeev* – management of the study to assessment of the influence of the length and number of heat pipes on the efficiency of removing excess thermal energy from the processor, analysis of the correctness of the modeling, editing the text of the article; *Aleh V. Stsepchankou* – formulation of the research problem, planning of experiments and discussion of the results obtained; *Aleksandr N. Popov* – idea of developing three-dimensional models, analysis of modeling results; *Andrey N. Belikov* – modeling of radiator constructions to assess the influence of the length and number of heat pipes on the efficiency of removing excess thermal energy from the processor; *Dmitry G. Rybakov* – building models of radiator constructions, preparing materials for publication.

For citation: Piskun G. A., Alexeev V. F., Stsepchankou A. V., Popov A. N., Belikov A. N., Rybakov D. G. Assessment of the influence of the length and number of heat pipes on the efficiency of the removal of excess thermal energy from the processor. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 139–150 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-2-139-150>

Received: 15.11.2023

Revised: 26.12.2023

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. Разработка современной вычислительной техники различного назначения строится на использовании инновационных решений, направленных на обеспечение функционирования устройств в жестких условиях (повышенная/пониженная температура окружающей среды или влажность, механические факторы и т. д.), реализации определенных технических требований (герметичность корпуса, использование только пассивных систем охлаждения, ограничение массогабаритных размеров в силу встраиваемости систем и т. д.), а также на достижение высокой производительности программно-аппаратных решений.

Одним из вариантов обеспечения теплового режима таких устройств является использование тепловых трубок (ТТ). Из [1–4] известно, что корректное использование ТТ значительно увеличивает производительность радиаторной конструкции, применяемой для отведения избыточной тепловой энергии от высокопроизводительных компонентов (например, современных графических или центральных процессоров). Трубки позволяют распределять большое количество тепловой энергии посредством переноса ее в другие части пространства, тем самым обеспечивая оптимальный тепловой режим. К основным преимуществам ТТ также можно отнести отсутствие движущихся механических частей (за движение теплоносителя отвечают только капиллярные силы); высокую плотность передаваемого теплового потока при минимальных перепадах температур (термических сопротивлений); автономность работы; возможность резервирования; минимальное обслуживание и малый удельный вес, а также бесшумную работу [5, 6].

В отличие от сплошных твердых сред (различные виды радиаторов, термопрокладок и т. д.) ТТ имеют переменную теплопроводность, которая в 10–100 раз превосходит теплопроводность сплошных медных радиаторов, зависящую от нескольких параметров, из которых самое заметное влияние на температурный градиент оказывает длина трубки [5, 6].

В связи с этим *цель исследования* – оценка влияния длины и количества тепловых трубок в составе находящейся в открытой среде (движение воздуха происходит без перемешивания, что характерно для свободной конвекции) или в замкнутой среде (происходит циркуляция потоков воздуха в замкнутом контуре, что свойственно для естественной конвекции в ограниченном пространстве) радиаторной конструкции на эффективность отведения избыточной тепловой энергии от процессора.

Методы и объекты исследования. Для проведения исследования были разработаны различные радиаторные конструкции, которые состояли из теплосъемной пластины, тепловой трубки и теплообменника (ребристого радиатора). Отличительной особенностью данных конструкций являлось количество ТТ (от 1 до 3 шт.) длиной от 100 до 500 мм (рис. 1).

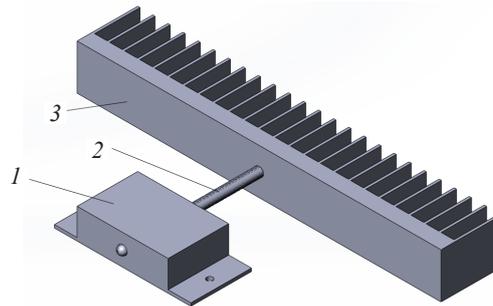


Рис. 1. Внешний вид радиаторной конструкции: 1 – теплосъемная пластина, 2 – тепловая трубка, 3 – теплообменник
Fig. 1. Appearance of the radiator construction: 1 – heat removal plate, 2 – heat pipe, 3 – heat exchanger

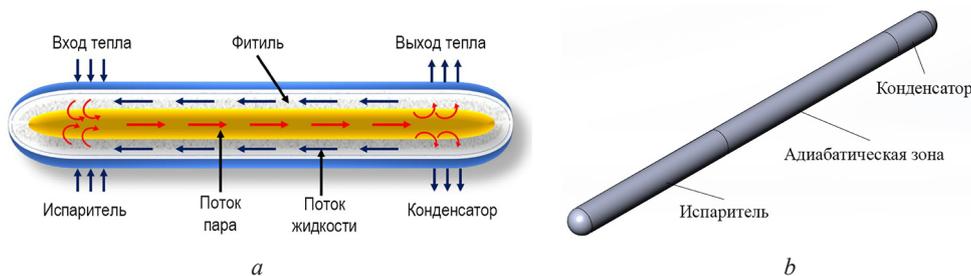


Рис. 2. Схема устройства тепловой трубки (a) [7] и разработанная на ее основе трехмерная модель (b)
Fig. 2. Scheme of the heat pipe device (a) and three-dimensional model created on its basis (b)

В инженерном модуле Flow Simulation программного комплекса SolidWorks были разработаны трехмерные модели элементов радиаторной конструкции, в частности в качестве теплообменника использовался алюминиевый ребристый радиатор с размерами $240 \times 30 \times 40$ мм (расположенные на основании ребра имеют размеры – $30 \times 30 \times 1,5$ мм) и количеством ребер 25 шт.

Теплосъемная пластина представляла собой медный пластинчатый радиатор с размерами $90 \times 40 \times 20$ мм. Ее нагрев в экспериментах осуществлялся выделяемой мощностью процессора, которая задавалась равной 10, 20, 30, 40 и 50 Вт. Это обусловлено тем, что данные значения являются типовыми для сегмента мобильных процессоров, которые наиболее часто применяются в ноутбуках и промышленных компьютерах.

В [7, 8] описаны принцип работы ТТ, а также ее строение. Трубка условно состоит из трех отдельных зон – испарителя, конденсатора и адиабатической (рабочей) зоны между ними (рис. 2, a). В испарителе к трубке подводится тепло, рабочая жидкость (хладагент) нагревается и испаряется, а в конденсаторе нагретый пар отдает тепловую энергию и конденсируется обратно в жидкую форму. Жидкость возвращается в испаритель за счет капиллярных сил, возникающих в структуре тепловых каналов. Построенная трехмерная модель представлена на рис. 2, b.

Диаметр ТТ, равный 6 мм, является самым распространенным в производстве компьютерных систем охлаждения [9].

В качестве тепловых каналов ТТ была выбрана модель, представленная на рис. 3. В сечении трубок расположены 20 желобчатых каналов, которые необходимы для движения хладагента, а также улучшают процессы теплопереноса.

Внутри тепловых трубок находится дистиллированная вода при пониженном постоянном давлении [11]. Предельную тепловую мощность Q_{\max} процессора при горизонтальном расположении ТТ ($\sin\varphi = 0$) определяли согласно уравнению [12–14]

$$Q_{\max} = \frac{C}{L}, \quad (1)$$

где $C = \frac{2 \cdot \sigma \cdot \cos\theta}{r_c} \cdot \left(\frac{\mu_l}{\rho_l \cdot A \cdot K \cdot H_{ev}} + \frac{8 \cdot \mu_v}{\pi \cdot r_v^4 \cdot H_{ev}} \right)^{-1}$ (σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Н/м; r_c – эффективный капиллярный радиус для жидкости, м; $\cos\theta$ – предельный крае-

вой угол смачивания; μ_l – вязкость жидкости, Па·с; ρ_l – плотность жидкости, г/см³; A – поперечное сечение теплового канала, м; K – проницаемость теплового канала; μ_v – вязкость пара, Па·с; r_v – эффективный капиллярный радиус для пара, м; H_{ev} – скрытая теплота парообразования, Вт/кг; L – расстояние между областью подвода и отвода тепла, м.

Из уравнения (1) видно, что отводимая ТТ максимальная мощность (капиллярное ограничение) обратно пропорциональна расстоянию между областью подвода и отвода тепла на тепловой трубке, то есть ее длине. При моделировании ТТ было использовано математическое упрощение с использованием эффективного теплового сопротивления [15].

Авторами были разработаны модели с тремя и пятью ТТ, расположенными на расстоянии 4 мм друг от друга (рис. 4). Их длина задавалась следующими значениями: 100, 200, 300, 400 и 500 мм.

Для корректного решения поставленной задачи были заданы следующие начальные и граничные условия моделирования:

- тип решаемой задачи – внешняя;
- силы гравитации направлены вниз, перпендикулярно поверхностям, значение ускорения свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$;
- температура окружающей среды 23 °С ($\approx 296 \text{ К}$) (нормы температуры на рабочем месте см.: СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах»);
- рассеиваемая процессором мощность – 10, 20, 30, 40 и 50 Вт;
- используемые в модели материалы: теплосъемная пластина и тепловые трубки – медь, ребристый радиатор – алюминий;
- эффективное тепловое сопротивление ТТ – 0,02 К/Вт;
- для тепловых каналов указывалось граничное условие «Подобласть течения», так как в них протекает движение дистиллированной воды при низком постоянном давлении;
- граничные условия для конвективного теплообмена ставились для всех поверхностей, контактирующих с воздухом.

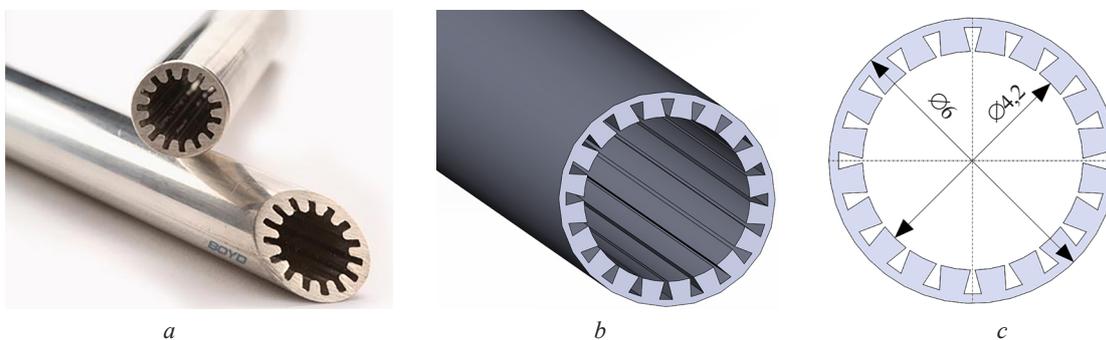


Рис. 3. Внешний вид тепловых каналов тепловой трубки (а) [10], их трехмерная модель (b) и размеры в сечении (c)
Fig. 3. Appearance of thermal channels of the heat pipe (a), its three-dimensional model (b) and dimensions in section (c)

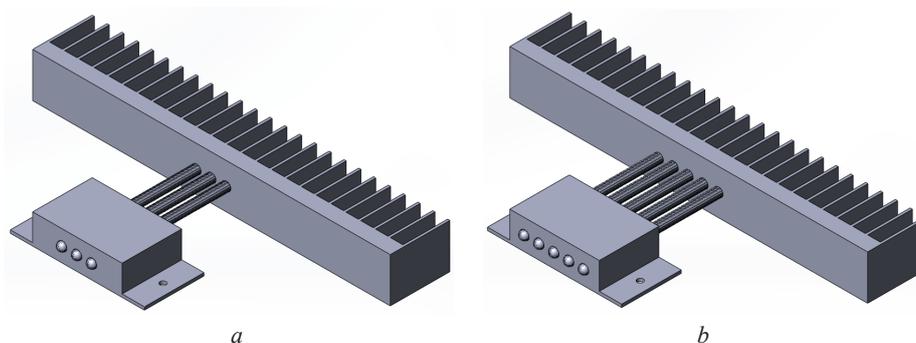


Рис. 4. Внешний вид радиаторной конструкции с тремя (а) и пятью (b) тепловыми трубками
Fig. 4. Appearance of a radiator construction with three (a) and five (b) heat pipes

Результаты вычислительных экспериментов по оценке эффективности отведения тепловой энергии от процессора в открытой среде. В ходе исследования были получены численные значения температур и разностей температур для разработанных моделей радиаторных конструкций с ТТ различной длины (от 100 до 500 мм) и количества (1, 3 и 5 шт.), расположенных в открытой среде. В качестве источника тепловыделения использовался процессор мощностью от 10 до 50 Вт (повышение осуществлялось с шагом 10 Вт).

Для радиаторной конструкции с одной тепловой трубкой результаты приведены на рис. 5.

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что одна ТТ обеспечила отведение избыточной тепловой энергии от процессора мощностью 30 Вт. Максимальное значение температуры процессора при данном значении мощности (83,62 °С) было достигнуто при длине тепловой трубки 400 мм, что не превышает предельную рабочую температуру процессора Intel® Core™ i5-13600H Processor, Technical Specifications, которая составляет 100 °С. При 40 Вт рассеиваемой мощности конструкция обеспечила отведение тепла до 101,5 °С при длине ТТ 400 мм, а при 50 Вт и различной длине трубки максимальные значения температур превысили значение 100 °С. Также установлено, что с увеличением длины и рассеиваемой мощности процессора повышается значение разности температур между горячим и холодным концом ТТ. Например, при длине 100 мм и мощности 50 Вт разность температур на концах трубки составила 6,63 °С, а при длине ТТ 500 мм и мощности 50 Вт наблюдалась разность 36,17 °С, что неприемлемо ввиду недостаточной производительности одной тепловой трубки.

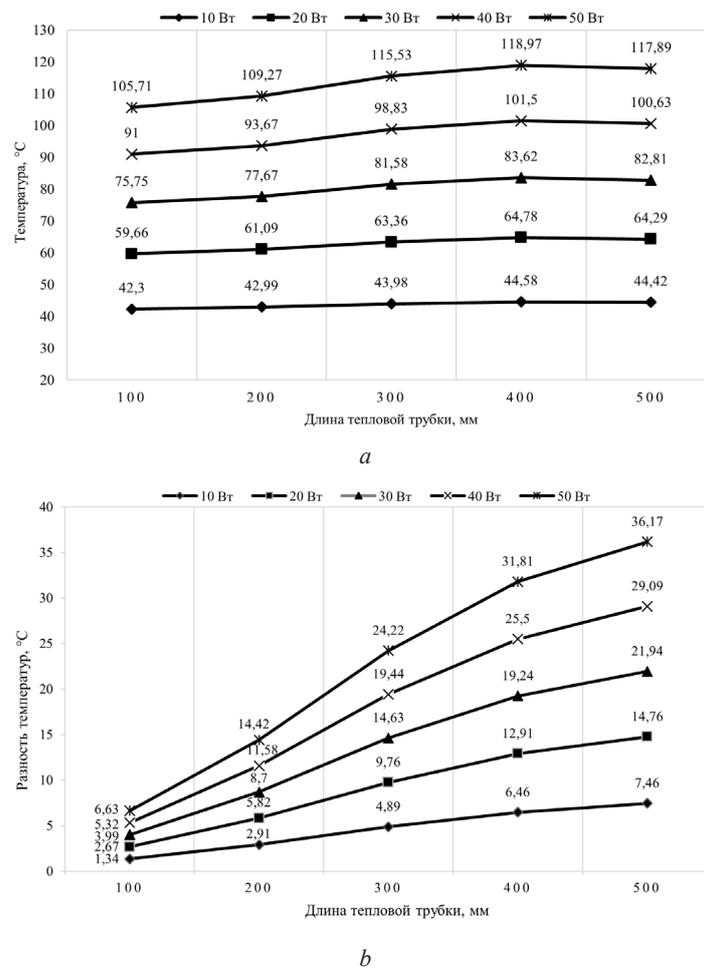


Рис. 5. Значения максимальных температур процессора (a) и разности температур на концах тепловой трубки (b) при различных длине и мощности для радиаторной конструкции с одной тепловой трубкой, расположенной в открытой среде

Fig. 5. Values of the maximum processor temperatures (a) and the temperature difference at the ends of the heat pipe (b) at different lengths and powers for a radiator construction with one heat pipe located in an open environment

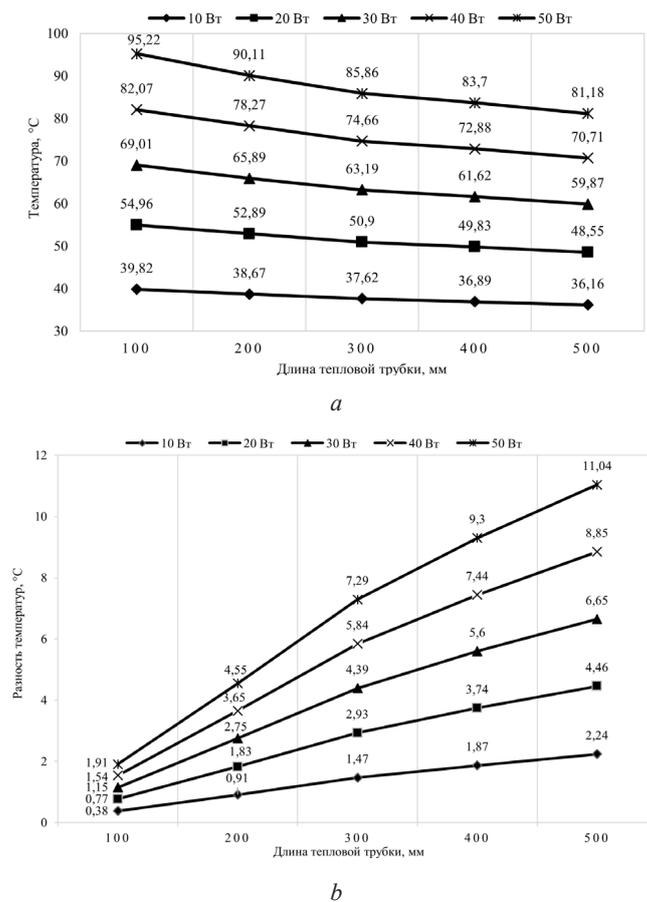


Рис. 6. Значения максимальных температур процессора (а) и разности температур на концах тепловой трубки (b) при различных длине и мощности для радиаторной конструкции с тремя тепловыми трубками, расположенными в открытой среде

Fig. 6. Values of the maximum processor temperatures (a) and the temperature difference at the ends of the heat pipe (b) at different lengths and powers for a radiator construction with three heat pipes located in an open environment

Использование трех ТТ в разработанной конструкции положительным образом сказалось на отведении избыточного тепла от процессора (рис. 6).

Видно, что полученные при моделировании значения не превышают 100 °С, а зависимость уменьшения температуры от увеличения длины трубок является практически линейной. Так, при 100 мм и 50 Вт рассеиваемой мощности максимум составил 95,22 °С, а при 500 мм и 50 Вт – 81,18 °С. Этой тенденции не было замечено при использовании одной тепловой трубки, где, наоборот, наблюдалась ситуация с увеличением максимальных значений температуры при увеличении длины ТТ: при 100 мм и 50 Вт одной ТТ максимальное значение на теплосъемнике составило 105,71 °С, а при 500 мм и 50 Вт – 117,89 °С соответственно. Это можно объяснить тем, что тепловые трубки находятся в открытой среде, где на них действует свободная конвекция. При рассмотрении разности температур между горячими и холодными концами трубок установлена положительная динамика: при 100 мм и 50 Вт разность составила 1,91 °С, при 500 мм и 50 Вт – 11,04 °С, что более чем в 3 раза эффективнее в сравнении со значениями, полученными при использовании одной ТТ при той же длине и мощности.

Увеличение количества тепловых трубок до пяти обеспечило наилучшее отведение избыточной тепловой энергии от процессора (рис. 7).

Так, в конструкции с пятью тепловыми трубками длиной 100 мм и 50 Вт рассеиваемой мощности процессор нагрелся до температуры 90,55 °С, а при длине 500 мм и 50 Вт – до 67,08 °С. Установлено, что в случае с одной ТТ длиной 500 мм при мощности процессора 50 Вт температура на процессоре составила 117,89 °С, при трех ТТ – 81,18 °С, а при пяти ТТ – 67,08 °С. Разность температур на концах ТТ также значительно изменяется: например, в конструкции с пятью ТТ

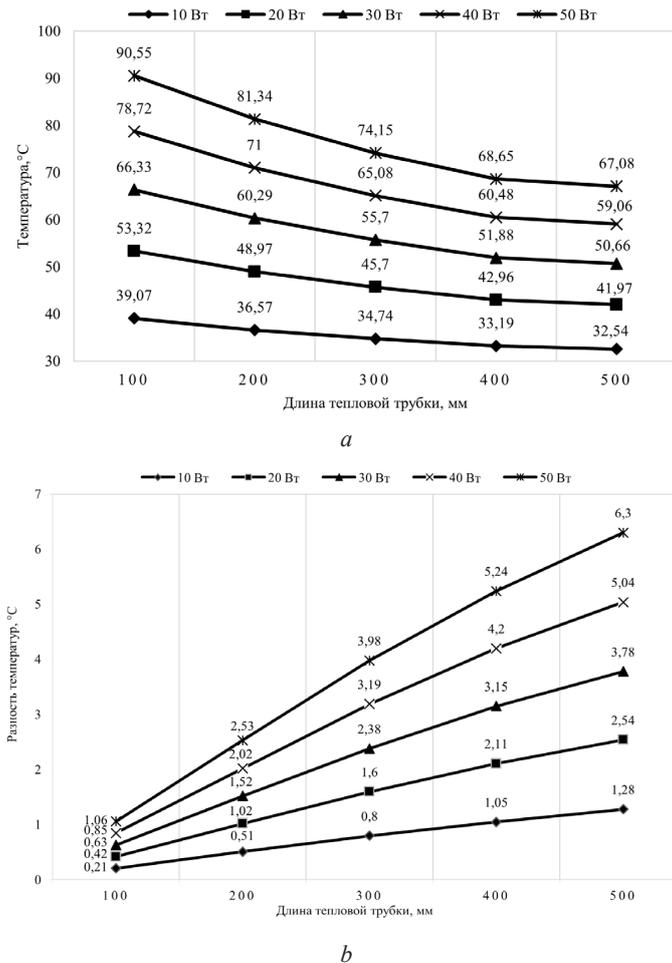


Рис. 7. Значения максимальных температур процессора (a) и разности температур на концах тепловой трубки (b) при различных длине и мощности для радиаторной конструкции с пятью тепловыми трубками, расположенными в открытой среде

Fig. 7. Values of the maximum processor temperatures (a) and the temperature difference at the ends of the heat pipe (b) at different lengths and powers for a radiator construction with five heat pipes located in an open environment

длиной 500 мм и мощности процессора 50 Вт разность между испарителем и конденсатором равна 6,3 °C, что на 4,74 °C эффективнее, чем у конструкции с тремя ТТ при тех же параметрах, и на 29,87 °C эффективнее, чем у конструкции с одной ТТ.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод, что увеличение количества тепловых трубок положительно сказывается на эффективности охлаждения. Что касается длины, то для конструкций с тремя и пятью тепловыми трубками результаты обладают общей тенденцией: с увеличением длины ТТ улучшаются показатели температур. В случае с одной ТТ было установлено, что при увеличении ее длины наблюдалась ситуация увеличения температуры до значений, превышающих предельные для исследуемого процессора. Максимальные показатели достигали значений выше 100 °C, что снижает работоспособность устройства.

Результаты вычислительных экспериментов по оценке эффективности отведения тепловой энергии от процессора в замкнутой среде. Были проведены эксперименты по оценке эффективности отведения тепловой энергии от процессора. В ходе исследования использовались ТТ различной длины и количества, входящие в состав радиаторной конструкции, расположенной в замкнутой среде (например, герметичный корпус устройства). Ограничивающая область (корпус) не участвовала в процессе теплообмена. На рис. 8 представлены результаты моделирования для конструкции с одной ТТ при увеличении мощности процессора от 10 до 50 Вт.

Установлено, что конструкция с одной тепловой трубкой обеспечила охлаждение до достижения мощности процессора 30 Вт и длины 100 мм, максимальное значение температуры соста-

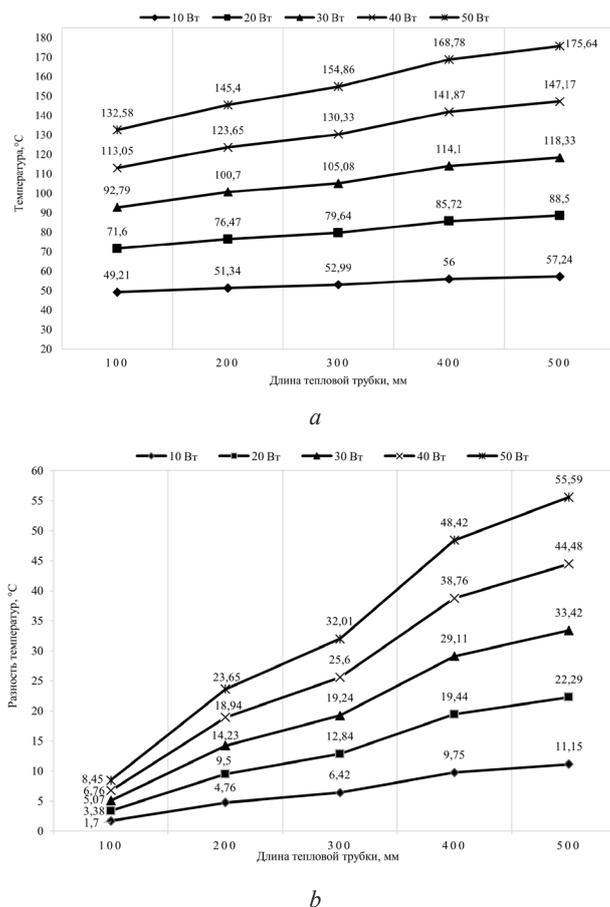


Рис. 8. Значения максимальных температур процессора (а) и разности температур на концах тепловой трубки (b) при различных длине и мощности для радиаторной конструкции с одной тепловой трубкой, расположенной в герметичном корпусе

Fig. 8. Values of the maximum processor temperatures (a) and the temperature difference at the ends of the heat pipe (b) at different lengths and power for a radiator construction with one heat pipe located in a sealed case

вило 92,79 °C, при 200 мм значение температуры достигло 100,7 °C, что является недопустимым для работы процессора. При мощности источника тепловыделения 40 и 50 Вт, а также при увеличении длины тепловой трубки наблюдается тенденция увеличения абсолютных показателей температуры, при которых устройство не сможет функционировать.

Дальнейшее увеличение количества ТТ приводит к повышению эффективности системы охлаждения устройства (рис. 9).

Так, конструкция с тремя тепловыми трубками смогла выдержать мощность 30 Вт, рассеиваемой процессором при любой рассматриваемой длине, максимальное значение температуры процессора составило 94,53 °C при длине ТТ 500 мм. При пяти ТТ устройству удалось отвести 40 Вт мощности при длине трубок 200 мм, температура на процессоре при этом достигла 99,96 °C (рис. 10).

Сравнивая полученные результаты с результатами для конструкций в открытой среде, необходимо отметить, что увеличение длины ТТ в замкнутой среде негативно сказывается на отведении избыточной тепловой энергии, так как тепло в корпусе не может быть распределено в окружающую среду из-за того, что он не вовлечен в процесс теплообмена. В то же время увеличение количества ТТ сказалось положительно на эффективности теплоотвода, как и в конструкциях в открытой среде.

Что касается разности температур на концах ТТ, то результаты в закрытой среде уступают значениям в открытой среде. Разность температур на концах ТТ в первом случае (в закрытой среде) для конструкции с одной ТТ при 50 Вт и 500 мм составила 55,59 °C, что на 19,42 °C хуже, чем в конструкции с одной тепловой трубкой, на 7,02 °C – с тремя ТТ и на 5,26 °C – с пятью ТТ во втором случае (в открытой среде).

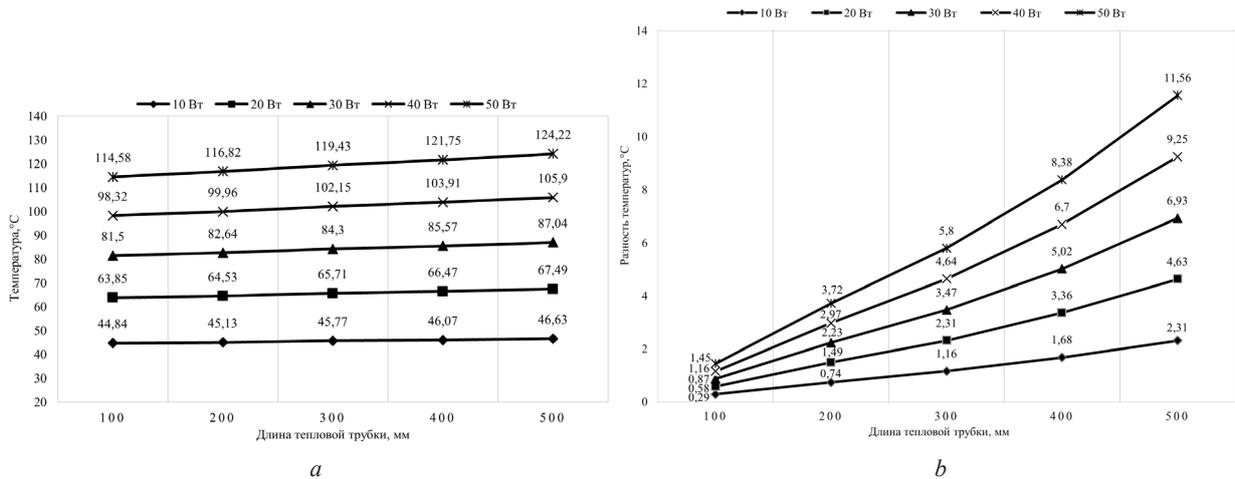


Рис. 9. Значения максимальных температур процессора (a) и разности температур на концах тепловой трубки (b) при различных длине и мощности для радиаторной конструкции с тремя тепловыми трубками, расположенными в герметичном корпусе

Fig. 9. Values of the maximum processor temperatures (a) and the temperature difference at the ends of the heat pipe (b) at different lengths and power for a radiator construction with three heat pipes located in a sealed case

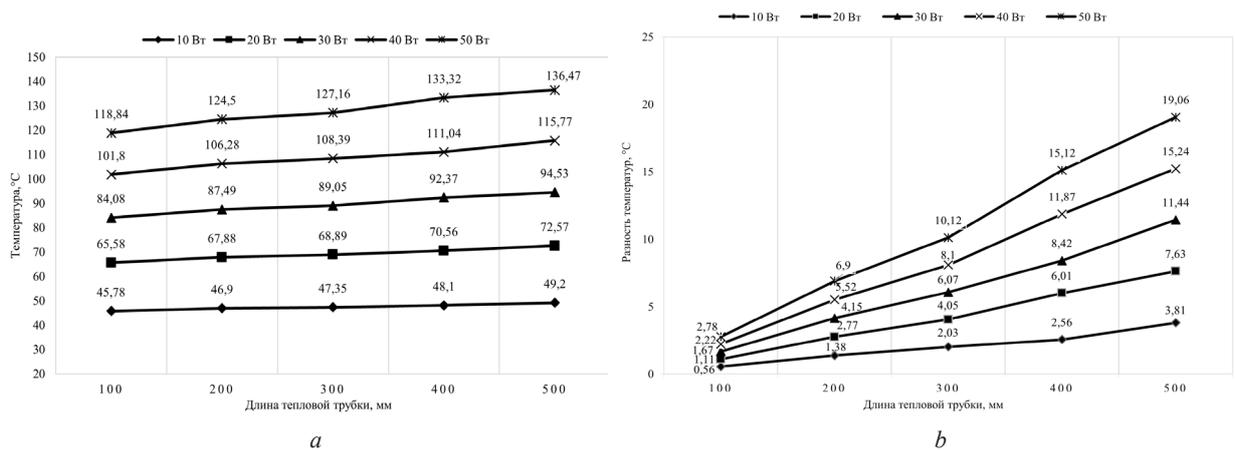


Рис. 10. Значения максимальных температур процессора (a) и разности температур на концах тепловой трубки (b) при различных длине и мощности для радиаторной конструкции с пятью тепловыми трубками, расположенными в герметичном корпусе

Fig. 10. Values of the maximum processor temperatures (a) and the temperature difference at the ends of the heat pipe (b) at different lengths and power for a radiator construction with five heat pipes located in a sealed case

Заключение. Проведено моделирование процессов формирования и отведения тепловой энергии от процессора посредством изменения параметров тепловых трубок в открытой и закрытой средах.

При увеличении длины ТТ в конструкциях, находящихся в открытой среде, наблюдается положительная динамика в улучшении эффективности системы охлаждения, за исключением конструкции с одной тепловой трубкой. Установлено, что изменение количества ТТ благоприятно сказалось на процессах отведения избыточной тепловой энергии от процессора в рассматриваемых конструкциях: в случае с одной тепловой трубкой длиной 500 мм при мощности процессора 50 Вт температура на процессоре составила 117,89 °С, при трех ТТ – 81,18 °С, а при пяти трубках – 67,08 °С.

В свою очередь при увеличении длины ТТ в конструкциях, находящихся в закрытой среде, прослеживается динамика ухудшения абсолютных показателей температуры на процессоре, а также разности температур на концах ТТ. Так, разность температур на концах ТТ в закрытой среде при 50 Вт и 500 мм составила 55,59 °С, что на 19,42 °С хуже, чем в конструкции

с одной тепловой трубкой в открытой среде. При 50 Вт и 500 мм для конструкции с тремя ТТ разность температур между испарителем и конденсатором составила 19,06 °С, а в открытой среде – 11,04 °С, а с пятью ТТ и теми же параметрами разность температур в закрытой среде на 5,26 °С уступила в эффективности конструкции в открытой среде.

Между тем увеличение количества ТТ в конструкциях, находящихся в открытой и закрытой средах, положительно сказывается на эффективности отведения тепловой энергии от процессора.

Полученные результаты могут быть использованы для модернизации систем охлаждения различных технических средств, построенных на базе процессоров, а также проектировании новой высокопроизводительной аппаратуры с учетом использования тепловых трубок.

Список использованных источников

1. Nemes, P. Mathematical model for heat transfer limitations of heat pipe / P. Nemes, A. Čaja, M. Malcho // *Math. Comput. Model.* – 2013. – Vol. 57, iss. 1–2. – P. 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.047>
2. Ван, Юй. Моделирование охлаждения процессора в наноспутнике с помощью контурных тепловых труб / Ван Юй, О. В. Денисов, Л. В. Денисова // *Вестн. РУДН. Сер.: Инженерные исследования.* – 2019. – Т. 20, № 3. – С. 211–219. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219>
3. Моделирование отведения тепловой энергии от процессоров при помощи кулеров воздушного охлаждения / Г. А. Пискун [и др.] // *Доклады БГУИР.* – 2023. – Т. 21, № 4. – С. 54–62. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62>
4. Влияние ориентации каналов в кулерах воздушного охлаждения на эффективность отведения тепла от мощных полупроводниковых приборов / Г. А. Пискун [и др.] // *Доклады БГУИР.* – 2023. – Т. 21, № 5. – С. 33–41. <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-33-41>
5. Соколов, Н. Ю. Математическое моделирование и оптимизация систем тепловых труб / Н. Ю. Соколов, В. А. Кулагин, Д. А. Нестеров // *Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии.* – 2021. – Т. 14, № 7. – С. 860–879. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0352>
6. Абиев, Р. Ш. Математическая модель теплообмена в микроканальной тепловой трубке с циркуляцией двухфазной среды / Р. Ш. Абиев, Р. Кумар // *Изв. СПбГТИ (ТУ).* – 2020. – Вып. 55 (81). – С. 61–67. <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-55-81-62-67>
7. Heat pipes: progress in thermal performance enhancement for microelectronics / S. U. Khalid [et al.] // *J. Therm. Anal. Calorim.* – 2020. – Vol. 143. – P. 2227–2243. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09820-7>
8. Faghri, A. Heat pipes: Review, opportunities and challenges / A. Faghri // *Frontiers in Heat Pipes.* – 2014. – Vol. 5. – P. 123–161. <https://doi.org/10.5098/fhp.5.1>
9. Heat Pipe Design Guide [Electronic resource] // CELSIA: Making Hot Technology Cooler. – Mode of access: <https://celsiainc.com/heat-sink-blog/heat-pipe-design-guide>. – Date of access: 14.11.2023.
10. Heat Pipes: Effective, Reliable Cooling Solutions [Electronic resource] // BOYD. – Mode of access: <https://www.boydcorp.com/thermal/two-phase-cooling/heat-pipe-assemblies.html>. – Date of access: 14.11.2023.
11. Vasiliev L. L. Heat pipes in modern heat exchangers / L. L. Vasiliev // *Appl. Therm. Eng.* – 2005. – Vol. 25, № 1. – P. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004>
12. Лукс, А. Л. Анализ основных расчетных и экспериментальных теплофизических характеристик аммиачных тепловых труб повышенной тепловой проводимости из алюминиевых сплавов / А. Л. Лукс, А. Г. Матвеев // *Вестн. СамГУ. Естественнонаучная серия.* – 2008. – № 3 (62). – С. 331–357.
13. Соколов, Н. Ю. Численное и физическое моделирование работы системы тепловых труб для отвода тепла от радиоэлектронного оборудования различного назначения / Н. Ю. Соколов, В. А. Кулагин // *Информационные и математические технологии в науке и управлении.* – 2022. – № 4 (28). – С. 50–69. <https://doi.org/10.38028/ESI.2022.28.4.004>
14. Höhne, T. CFD simulation of a heat pipe using the homogeneous model / T. Höhne // *Int. J. Thermofluids.* – 2022. – № 15. – P. 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100163>
15. SOLIDWORKS Flow Simulation Electronics Cooling. Part 3: Heat Pipes [Electronic resource]. – 2019. – Mode of access: <https://www.cati.com/blog/solidworks-flow-simulation-electronics-cooling-part-3-heat-pipes>. – Date of access: 14.11.2023.

References

1. Nemes P., Čaja A., Malcho M. Mathematical model for heat transfer limitations of heat pipe. *Mathematical and Computer Modelling*, 2013, vol. 57, iss. 1–2, pp. 126–136. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2011.06.047>
2. Wang Yu, Denisov O. V., Denisova L. V. Simulation of processor cooling in a nanosatellite using loop heat pipes. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*, 2019, vol. 20, no. 3, pp. 211–219 (in Russian). <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-3-211-219>
3. Piskun G. A., Alexeev V. F., Belikov A. N., Rybakov D. G. Simulation of Thermal Energy Removal from Processors Using Air Coolers. *Doklady BGUIR*, 2023, vol. 21, no. 4, pp. 54–62 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-4-54-62>
4. Piskun G. A., Alexeev V. F., Belikov A. N., Rybakov D. G. Influence of channel orientation in air coolers on the efficiency of heat removal from powerful semiconductor devices. *Doklady BGUIR*, 2023, vol. 21, no. 5, pp. 33–41 (in Russian). <https://doi.org/10.35596/1729-7648-2023-21-5-33-41>

5. Sokolov N. Yu., Kulagin V. A., Nesterov D. A. Mathematical modeling and optimization heat pipe systems. *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii = Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*, 2021, vol. 14, no. 7, pp. 860–879 (in Russian). <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0352>
6. Abiev R. S., Kumar R. Mathematical Model of Heat Transfer in a Microchannel Heat Pipe with Circulation of a Two-Phase Medium. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta) = Bulletin of the Saint Petersburg State Institute of Technology (Technical University)*, 2020, iss. 55 (81), pp. 61–67 (in Russian). <https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-55-81-62-67>
7. Khalid S. U., Babar H., Ali H. M., Janjua M. M., Ali M. A. Heat pipes: progress in thermal performance enhancement for microelectronics. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2020, vol. 143, pp. 2227–2243. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-09820-7>
8. Faghri A. Heat pipes: review, opportunities and challenges. *Frontiers in Heat Pipes*, 2014, vol. 5, pp. 123–161. <https://doi.org/10.5098/fhp.5.1>
9. Heat Pipe Design Guide. *CELSIA: Making Hot Technology Cooler*. Available at: <https://celsiainc.com/heat-sink-blog/heat-pipe-design-guide> (accessed 14 November 2023).
10. Heat Pipes: Effective, Reliable Cooling Solutions. *BOYD*. Available at: <https://www.boydcorp.com/thermal/two-phase-cooling/heat-pipe-assemblies.html> (accessed 14 November 2023).
11. Vasiliev L. L. Heat pipes in modern heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*. 2005, vol. 25, no. 1, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.12.004>
12. Luks A. L., Matveev A. G. Analysis of the main calculated and experimental thermophysical characteristics of ammonia heat pipes with increased thermal conductivity from aluminum alloys. *Vestnik Samarskogo universiteta. Estestvennonauchnaya seriya = Vestnik of Samara University. Natural Science Series*, 2008, no. 3 (62), pp. 331–357 (in Russian).
13. Sokolov N. Yu., Kulagin V. A. Numerical and physical modeling of the operation of a heat pipe system for heat removal from radioelectronic equipment for various purposes. *Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii = Information and Mathematical Technologies in Science and Management*, 2022, vol. 4, no. 28, pp. 50–69 (in Russian). <https://doi.org/10.38028/ESI.2022.28.4.004>
14. Höhne T. CFD simulation of a heat pipe using the homogeneous model. *International Journal of Thermofluids*, 2022, vol. 15, pp. 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2022.100163>
15. *SOLIDWORKS Flow Simulation Electronics Cooling. Part 3: Heat Pipes*. 2019. Available at: <https://www.cati.com/blog/solidworks-flow-simulation-electronics-cooling-part-3-heat-pipes> (accessed 14 November 2023).

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

**ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ
И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ**
DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-151-165>
УДК 536.468;544.454.3;621.039.587



Оригинальная статья

Д. Л. Третинников, А. В. Дойникова*, П. К. Нагула

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси,
Луговослободской с/с, р-н д. Прилесье, 47/22, 223063, Минский район,
Минская область, Республика Беларусь*

**АНАЛИЗ ВОДОРОДНОЙ ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ АЭС С РЕАКТОРОМ ТИПА
ВВЭР-1200/В-491 ПРИ ПРОТЕКАНИИ ТЯЖЕЛОЙ ЗАПРОЕКТНОЙ АВАРИИ**

Аннотация. Представлены результаты расчетного анализа с помощью программного средства COCOSYS возможных режимов горения водородсодержащей паровоздушной смеси в объеме, ограниченном герметичным ограждением, при протекании тяжелой запроектной аварии (ЗПА). В качестве объекта исследования рассмотрена защитная оболочка энергоблока АЭС с реакторной установкой типа ВВЭР-1200/В-491. Исходным событием исследуемой тяжелой запроектной аварии (ЗПА) с течью теплоносителя принят отрыв трубопровода впрыска системы компенсации давления (Ду179), при этом накладывалось условие одновременного отказа всех активных каналов системы аварийного охлаждения активной зоны реактора. Рассчитаны параметры термодинамического состояния (давление и температура) газовой смеси, а также значения концентрационного распределения водорода в атмосфере под защитной оболочкой. Полученные результаты расчета распространения, накопления водорода и изменения параметров среды использованы для анализа возможных режимов горения в помещениях с использованием трехкомпонентной диаграммы Шапиро–Моффетти. Результаты показали, что при исследуемой тяжелой ЗПА детонация водородсодержащей смеси исключается, а дефлаграция возможна только в боксе парогенераторов, в котором происходит разрыв трубопровода. Таким образом, водородная взрывобезопасность на атомной станции согласно «Правилам обеспечения водородной взрывозащиты на атомных электростанциях с реакторами типа ВВЭР» считается обеспеченной. Эффективность функционирования системы удаления водорода из защитной оболочки с помощью каталитической рекомбинации для рассматриваемой ЗПА принимается достаточной.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, атомная электростанция, защитная оболочка, тяжелая авария, водородная безопасность, горение, пассивный каталитический рекомбинатор водорода

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Третинников Денис Леонидович* – старший научный сотрудник Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: trdl@list.ru; *Дойникова Анастасия Вячеславовна** – научный сотрудник Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: sirius1991dav_asa@mail.ru; *Нагула Петр Константинович* – кандидат технических наук, заведующий лабораторией Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: nagulapk@mail.ru

Вклад авторов: *Третинников Денис Леонидович* – проведение вычислений, компьютерное моделирование, графическое представление результатов, интерпретация результатов расчетов, формулировка выводов, редактирование текста рукописи; *Дойникова Анастасия Вячеславовна* – сбор данных литературы, сбор и систематизация данных, создание расчетной модели, проведение вычислений, написание и оформление текста рукописи; *Нагула Петр Константинович* – постановка исследовательских целей и задач, планирование вычислений, обсуждение результатов и выводов, критический пересмотр текста рукописи.

Для цитирования: Третинников, Д. Л. Анализ водородной взрывобезопасности АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/491 при протекании тяжелой запроектной аварии / Д. Л. Третинников, А. В. Дойникова, П. К. Нагула // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 151–165. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-151-165>

Поступила в редакцию: 17.07.2023

Доработанный вариант: 03.06.2024

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Original article

Denis L. Tretinnikov, Anastasiya V. Doinikova*, Petr K. Nagula

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny
of the National Academy of Sciences of Belarus,
47/22, Lugovoslobodskaya village, 223063, District of the Prilesye village, Minsk District,
Minsk Region, Republic of Belarus*

ANALYSIS OF THE HYDROGEN SAFETY OF THE NPP WITH A VVER-1200/V-491 REACTOR IN A SEVERE BEYOND DESIGN BASIS ACCIDENT

Abstract. The results of a computational analysis of possible modes of combustion of a hydrogen-air mixture in containment during the evolution of a severe beyond design basis accident (BDBA) with the COCOSYS code are presented. The containment of the NPP with a VVER-1200/V-491 reactor was selected as the object of study. BDBA with loss of coolant occurs due to a break of the injection pipeline of the pressurizer system (LOCA DN179) and the simultaneous failure of all active channels of the emergency core cooling system (ECCS). The calculated parameters of the thermodynamic state (pressure and temperature) of the gas mixture are given, and the values of the concentration distribution of hydrogen inside the containment are presented. After calculating the hydrogen distribution and mixing in all compartments of the containment, an evaluation was made of the flammability of the mixture and the potential for self-ignition in the containment by using a three-component Shapiro-Moffette diagram. It was concluded that in BDBA (LOCA DN179 with failure of active ECCS) detonation of the hydrogen-containing mixture is excluded, and deflagration is possible only in the emergency compartment of steam generators with a pipeline break. Thus, the hydrogen risk mitigation has been achieved in accordance with the standards established by the Belarusian regulator, provided that the localization safety systems are operational in the event of hydrogen deflagration. And the efficiency of the hydrogen removal system from the containment using catalytic recombination is considered sufficient for the considered BDBA.

Keywords: computer simulation, nuclear power plant, containment, severe accident, hydrogen safety, combustion, passive autocatalytic hydrogen recombiner

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

Information about the authors: *Denis L. Tretinnikov* – Senior Researcher at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: trdl@list.ru; *Anastasiya V. Doinikova** – Researcher at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Science of Belarus. E-mail: sirius-1991dav_asa@mail.ru; *Petr K. Nagula* – Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny. E-mail: nagulapk@mail.ru

Contribution of the authors: *Denis L. Tretinnikov* – performing calculations, computer modelling, graphical representation of the results, interpretation of calculation results, formulation of conclusions, editing the text of the manuscript; *Anastasiya V. Doinikova* – collection of literature data, collection and systematization of data, creation of a calculation model, performing calculations, writing and formatting the text of the manuscript; *Petr K. Nagula* – setting research goals and objectives, planning calculations, discussion of results and conclusions, critical revision the text of the manuscript.

For citation: Tretinnikov D. L., Doinikova A. V., Nagula P. K. Analysis of the hydrogen safety of the NPP with a VVER-1200/V-491 reactor in a severe beyond design based accident. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 151–165 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-151-165>

Received: 17.07.2023

Modified: 03.06.2024

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. В Японии в результате землетрясения 11 марта 2011 г. и вызванного им цунами произошло полное обесточивание АЭС «Фукусима-1», включая потерю работоспособности систем аварийного и резервного электроснабжения. Это привело к отказу систем аварийного охлаждения и расплавлению остановленных реакторов. В результате протекания пароциркониевой реакции и взаимодействия расплава корнума с бетоном в защитную оболочку было выброшено большое количество водорода. Именно произошедшие взрывы водорода на энергоблоках

в итоге определили разрушение последнего защитного барьера безопасности и значительные выбросы радиоактивных продуктов в окружающую среду [1].

Формально на японской атомной станции были предусмотрены системы для минимизации вероятности водородного взрыва. Однако функциональная устойчивость технических средств в условиях тяжелой запроектной аварии оказалась недостаточной для поддержания целостности герметичного ограждения.

Авария на АЭС «Фукусима-1» показала актуальность проблемы обеспечения водородной взрывобезопасности на энергоблоках АЭС для условий тяжелых аварий, а исключение водородного взрыва или смягчение его последствий является одной из приоритетных проблем безопасности АЭС.

Перечень наиболее актуальных научных и технологических проблем обеспечения водородной взрывобезопасности для АЭС с ВВЭР [2] включает задачи обеспечения безопасной работы рекомбинаторов водорода для условий тяжелых аварий, вопросы по достоверному моделированию стратифицированных течений водородсодержащих газовых смесей, проблему уточнения количественных критериев водородной взрывобезопасности. Недостатками применения рекомбинаторов водорода являются риск непреднамеренного воспламенения водородсодержащей смеси и невозможность целенаправленного управления процессом каталитического окисления [3–6]. Изучение теплоизоляционных элементов с каталитическим покрытием, обладающих свойством тепловой самозащитности, было заявлено в качестве задач в европейском проекте THINCAT [7].

Исследование проблемы достоверного моделирования распространения и горения водорода проводилось в таких международных проектах, как SARNET [8], REKO [9], THAI [10], MITHYGENE [11]. Применение компьютерных кодов к анализу водородной взрывобезопасности на АЭС представлено в документе «Status Report on Hydrogen Management and Related Computer Codes» [12].

В связи с вводом в эксплуатацию АЭС решение проблемы безопасности является актуальной задачей и в Беларуси. В настоящий момент специалистами научного учреждения «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны» Национальной академии наук Беларуси ведутся работы по проведению детерминистического анализа безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР, включая обоснование водородной безопасности при тяжелых авариях.

Цель работы – используя программное средство COCOSYS, выполнить оценку возможности дефлаграции/детонации водородсодержащей смеси в атмосфере под защитной оболочкой АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при протекании тяжелой запроектной аварии.

Нормативные требования и критерии водородной взрывобезопасности для АЭС. Водородная взрывобезопасность на атомной станции согласно «Правилам обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции»¹ и аналогичному нормативному документу «Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомных электростанциях с реакторами типа ВВЭР»² считается обеспеченной, если:

- 1) при проектных авариях исключаются детонация и дефлаграция водородсодержащих смесей в помещениях, расположенных в объеме, ограниченном герметичным ограждением;
- 2) при запроектных авариях (ЗПА) детонация исключается, а дефлаграция допускается при условии, если локализирующие системы безопасности выполняют функции, определенные проектом атомной станции.

В «Правилах устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций»³ содержится требование о том, что оборудование систем локализации не должно являться источником воспламенения взрывоопасных газов.

¹ Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомной станции (НП-040-02): утв. постановлением Госатомнадзора России от 31 дек. 2002 № 14. URL: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/НП-040-02/НП-040-02_conv.pdf (дата обращения: 07.07.2023).

² Правила обеспечения водородной взрывозащиты на атомных электростанциях с реакторами типа ВВЭР: нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности: постановление М-ва по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 11 мая 2010 г., № 19. URL: https://gosatomnadzor.mchs.gov.by/upload/iblock/05e/postanovlenie_mchs_19.pdf (дата обращения: 07.07.2023).

³ Правила устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций (НП-010-16): утв. приказом Федерал. службы по эколог., технол. и атом. надзору от 24 февраля 2016 г. № 70. URL: https://docs.secnrs.ru/documents/nps/НП-010-16/НП-010-16_conv.pdf (дата обращения: 07.07.2023).

Достаточными условиями дефлаграции и детонации водородсодержащих смесей является критическое сочетание концентраций горючего (водород), окислителя (кислород воздуха) и флегматизатора (водяной пар) при определенном термодинамическом состоянии газовой смеси (давлении и температуре).

При анализе взрывоопасности принято в качестве критерия возникновения условий дефлаграции и детонации использовать трехкомпонентную диаграмму Шапиро–Моффетти (рис. 1) [13], при этом состояние водородсодержащей паровоздушной смеси под защитной оболочке реактора определяется в виде точки текущего состояния в координатах «концентрация пара – концентрация воздуха – концентрация водорода» (с учетом влияния на воспламеняемость смеси горючего угарного газа и других газов).

Тогда критерием водородной взрывобезопасности является:

при проектной аварии – состояние атмосферы под защитной оболочкой, определенное вне области В (рис. 1, *a*) и на бесцветной области (рис. 1, *b*);

при ЗПА – состояние атмосферы под защитной оболочкой, определенное вне области А (рис. 1, *a*) и вне темно-оранжевой области (рис. 1, *b*).

Проектные пределы при проектной аварии устанавливаются следующими: предел составляет не более 2 об.% концентрации водорода в среднем по объему защитной оболочки, то есть 50 % от нижнего концентрационного предела распространения пламени.

В свою очередь, при запроектной аварии эти пределы определяются одним из трех требований:

- 1) не более 4 % объемной концентрации водорода в сухой атмосфере защитной оболочки;
- 2) более 8 % объемной концентрации водорода при концентрациях водяного пара более 60 об.% и воздуха менее 20 об.% (кислорода менее 5 об.%);
- 3) в интервале 4÷8 % объемной концентрации водорода при концентрациях водяного пара менее 60 об.% и воздуха более 20 об.% (кислорода более 5 об.%) должно быть показано отсутствие повреждений систем, важных для безопасности.

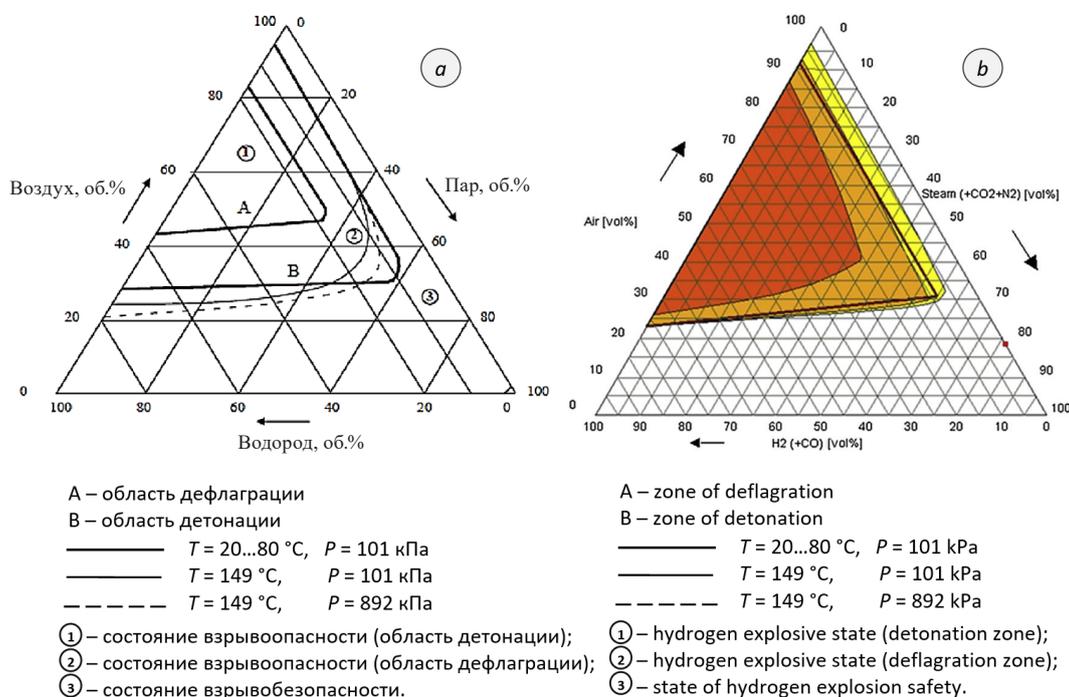


Рис. 1. Треугольная диаграмма Шапиро–Моффетти для смеси водород–пар–воздух (*a*) и для трехкомпонентной смеси с примесями азота и оксидов углерода (*b*); темно-оранжевая область – состояние детонации, светло-оранжевая область – состояние быстрой дефлаграции, желтая область – состояние медленной дефлаграции, бесцветная область – состояние взрывобезопасности

Fig. 1. Shapiro–Moffette ternary diagram for hydrogen-steam-air mixture (*a*) and for a three-component mixture in the presence of nitrogen and carbon oxides in the containment atmosphere (*b*); dark orange area – detonation, light orange area – fast deflagration, yellow area – slow deflagration; colorless area – state of hydrogen explosion safety

Система удаления водорода из защитной оболочки. В настоящий момент в большинстве стран, в том числе в Беларуси и России, обеспечение водородной взрывобезопасности реализуется оснащением АЭС системами удаления водорода при авариях. В составе такой системы, как правило, применяются пассивные каталитические рекомбинаторы водорода (ПКРВ), которые располагаются в местах возможного скопления водорода при авариях.

Принцип действия ПКРВ заключается в рекомбинации водорода с кислородом воздуха на катализаторе, при этом внешний источник энергии не используется. В случае попадания водорода на поверхность катализатора происходит экзотермическая химическая реакция соединения водорода и кислорода, сопровождающаяся выделением водяного пара и тепла.

Энергия, выделяющаяся в ходе реакции, расходуется на нагрев каталитической поверхности и смеси газов внутри бокса. Такой нагрев приводит к возникновению свободно конвективного течения, которое ускоряется в тяговом участке, расположенном над областью рекомбинации. В корпусе ПКРВ возникает устойчивый восходящий поток, обеспечивающий непрерывное поступление газовой смеси к катализатору и отвод образующегося водяного пара через перфорацию, выполненную в верхней части корпуса ПКРВ. Нагретая и обедненная водородом газовая смесь, выходящая из верхней части рекомбинатора, способна частично перемешивать газ внутри помещения, в котором установлены ПКРВ. Тем самым снижается риск локального воспламенения горючей смеси.

Пассивные каталитические рекомбинаторы водорода начинают самостоятельно функционировать при образовании в помещении повышенной концентрации водорода и продолжают работать, пока концентрация водорода не снизится до безопасного значения. В остальное время они находятся в режиме ожидания в состоянии готовности.

В большинстве существующих конструкций ПКРВ каталитические активные материалы (обычно платина или палладий) нанесены на несущие элементы – металлические пластины (Siemens/AREVA (Франция)) или пористые керамические элементы с развитой поверхностью контакта: шарики или цилиндры (NIS Ingenieurgesellschaft mbH (Германия); AECL/CNL (Канада); ЗАО ИНПК «РЭТ» (Россия)).

На Белорусской АЭС первоначально согласно разработанному проекту должны были использоваться 44 рекомбинатора фирмы AREVA двух типоразмеров: FR90/1-750T и FR90/1-1500¹, суммарной производительностью по водороду приблизительно 188 кг/ч при давлении 0,15 МПа и объемной концентрации водорода 4 об.%.

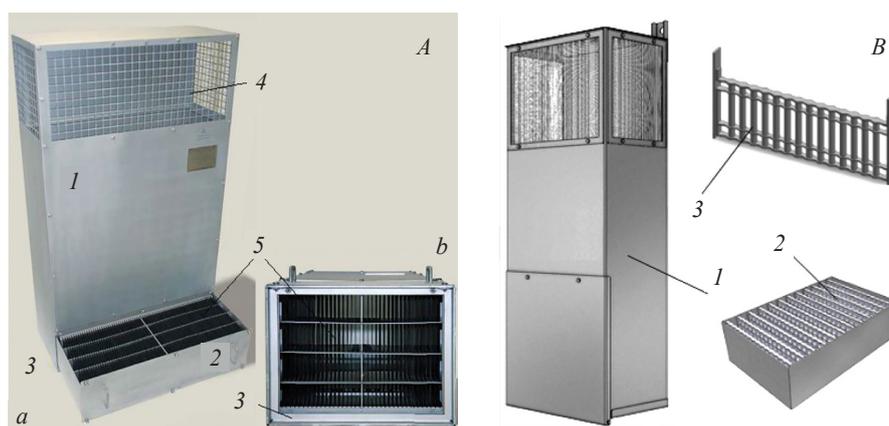


Рис. 2. А – Устройство пластинчатого пассивного каталитического рекомбинатора водорода (FR90/1-1500):

1 – корпус, 2 – кассета, 3 – входное отверстие, 4 – выходное отверстие, 5 – пластины; а – вид сбоку, кассета выдвинута для обслуживания пластин, б – вид снизу, кассета в рабочем положении;

В – устройство цилиндрического пассивного каталитического рекомбинатора водорода (РВК-500): 1 – корпус, 2 – каталитический блок с комплектом рамок, 3 – металлическая рамка с цилиндрическим катализатором

Fig. 2. А – Picture of plate passive autocatalytic hydrogen recombiner (FR90/1-1500): 1 – framework, 2 – catalyst unit (cassette), 3 – inlet, 4 – outlet, 5 – catalytic plates; а – side view, unit extended, б – bottom view;

В – picture of cylindrical passive autocatalytic hydrogen recombiner (RVK-500): 1 – framework, 2 – catalyst unit consisting of a set of catalytic frames, 3 – catalyst rods combined in frames

¹ AREVA Passive Autocatalytic Recombiner: Brochure G-008-V3-13-ENGPB / AREVA GmbH, Germany. Erlangen, 2013. 4 p.

Позднее проектировщиком было принято решение использовать ПКРВ производства АО ИНПК «РЭТ» модели РВК-3 и РВК-4, применяемые на российских АЭС с реакторной установкой типа ВВЭР [14]. В нижней части (в зависимости от модели рекомбинатора возможно и в средней части) металлического корпуса установлен блок катализатора, который состоит из комплекта металлических рамок. Катализатор в рекомбинаторах производства этой фирмы представляет собой цилиндрический стержень из пористого оксида алюминия с нанесенным в поверхностные поры платиновым покрытием и устанавливается в металлические рамки. Суммарная производительность 16 рекомбинаторов РВК-3 и 28 РВК-4 при давлении 0,15 МПа и объемной концентрации водорода 4 об.% составляет приблизительно 193 кг/ч.

Технические характеристики рекомбинаторов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Технические характеристики рекомбинаторов АЭС
Table 1. Technical characteristics of passive autocatalytic recombiners (PAR) of the NPP

Характеристики рекомбинаторов	AREVA		РЭТ	
	FR90/1-750T	FR90/1-1500	РВК-3	РВК-4
Количество рекомбинаторов, шт.	16	28	16	28
Размеры (длина, ширина, высота), мм	800×326×1400	1550×326×1400	850×530×1650	1720×530×1650
Масса, кг	75	125	175	350
Материал корпуса	Нержавеющая сталь			
Материал основы катализатора	Жаропрочная нержавеющая сталь		Оксид алюминия	
Каталитическое покрытие	Pt/Pd субстрат		Pt	
Количество каталитических пластин для AREVA (рамок каталитических для РЭТ), шт.	75	150	480	960
Размер каталитических пластин для AREVA (рамок каталитических для РЭТ), мм	140 × 290		198 × 13 × 80	
Производительность при давлении 0,15 МПа и концентрации водорода 4 об.%, кг/ч	2,4	5,36	2,68	5,36
Стартовая концентрация водорода, об.%	2,0		0,45	
Время выхода на номинальную производительность, с	Не более 100		Не более 180	

Анализ с использованием программного средства COCOSYS водородной безопасности АЭС при протекании тяжелой запроектной аварии. Начиная с 2021 г. специалистами Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси с помощью программного средства (ПС) COCOSYS выполняется расчетная оценка обоснования безопасности АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при тяжелых запроектных авариях. ПС COCOSYS представляет собой теплогидравлический реалистический код, предназначенный для расчета термодинамических параметров парогазовой среды в объеме под защитной оболочкой реактора при протекании аварийных процессов с учетом работы систем безопасности. Версия v2.4 ПС COCOSYS была официально передана белорусской стороне немецкими разработчиками GRS (Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit) в рамках международной программы BE/RA/07 «Развитие технического сотрудничества в области ядерной безопасности».

Для расчета параметров под защитной оболочкой с использованием ПС COCOSYS необходимо провести дискретизацию пространства, а именно разделить всю расчетную область на контрольные объемы (КО). На рис. 3, а показана разработанная авторами схема дискретизации пространства под защитной оболочкой для проведения анализа тяжелых ЗПА, состоящая из 120 контрольных объемов, 253 атмосферных и 133 дренажных соединений, 204 теплообменных структур. В модели учитываются работа системы пассивного отвода тепла от защитной оболочки (СПОТ 30); тепло- и массообмен в межоболочечном пространстве; функционирование системы удаления водорода из защитной оболочки. Место течи моделируется в парогенераторном боксе (который разбивается на четыре контрольных объема (8-1, 8-2, 8-3, 8-4) и приямок КО 25. Этот бокс имеет связь с отсеком компенсатора давления, который задается контрольными объемами 7-1 и 7-2. Зоной выброса через разрыв трубопровода принимается КО 8-2 (см. рис. 3, а).

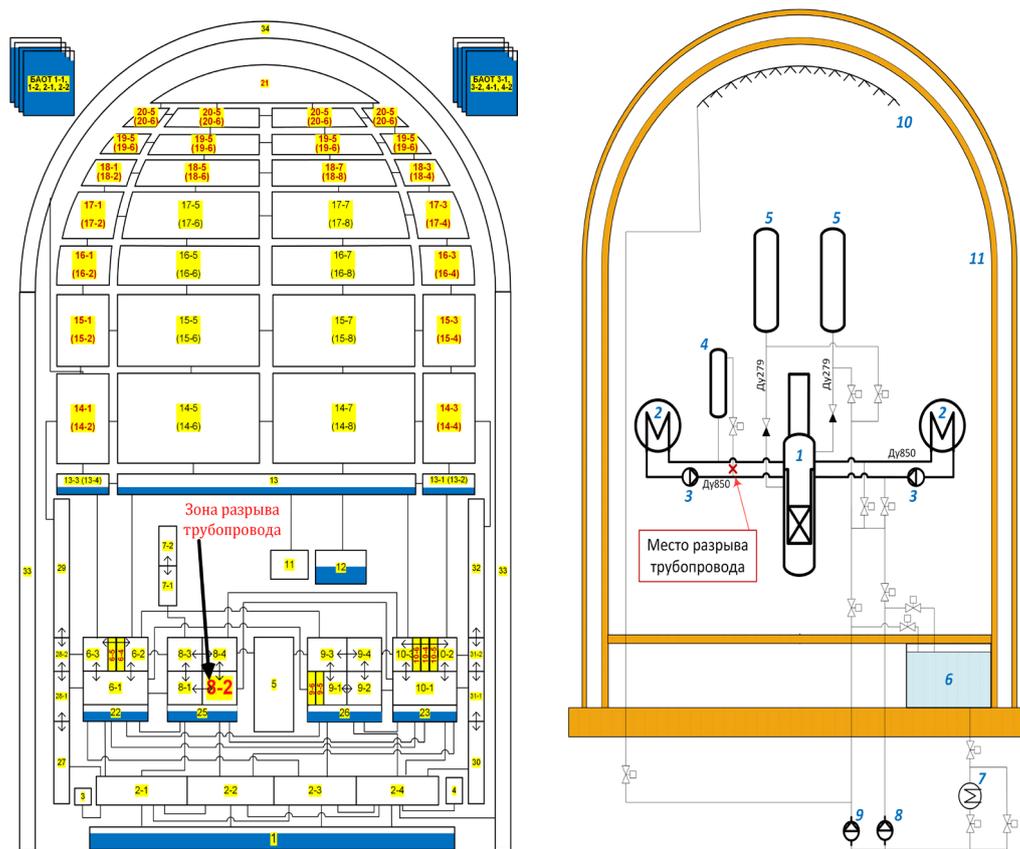


Рис. 3. Схема дискретизации расчетной области защитной оболочки для анализа тяжелых аварий (а) и упрощенная схема реакторной установки АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 (б): 1 – реактор; 2 – парогенератор; 3 – главный циркуляционный насос; 4 – компенсатор давления; 5 – гидроемкость системы аварийного охлаждения активной зоны реактора; 6 – бак-приямok борированной воды; 7 – теплообменник системы аварийного охлаждения активной зоны реактора; 8 – насос системы аварийного впрыска высокого давления; 9 – насос системы аварийного впрыска низкого давления; 10 – спринклерный коллектор с соплами; 11 – защитная оболочка

Fig. 3. Discretization scheme of the estimated containment volume for severe accident analysis (a), and simplified scheme of the reactor system of the NPP with a VVER-1200/V-491 reactor (b): 1 – reactor; 2 – steam generator; 3 – main circulation pump; 4 – pressurizer; 5 – hydraulic vessel of emergency core cooling system; 6 – borated water sump tank; 7 – emergency cooling heat exchanger; 8 – high-pressure safety injection pump; 9 – low-pressure coolant injection pump; 10 – spray header with nozzles; 11 – containment

В качестве исходного события принимается разрыв трубопровода впрыска Ду179 (219 × 20 мм), осуществляющего связь компенсатора давления с напорным участком «холодной» нитки 3-й петли (место разрыва см. рис. 3, б). Место течи находится на расстоянии ~ 12 м от входного патрубка (1,5 м от насоса на горизонтальном участке) «холодной» нитки 3-й петли.

На исходное событие по принятым условиям протекания запроектной аварии накладывается отказ всех каналов активной части системы аварийного охлаждения активной зоны – наносы систем аварийного впрыска высокого и низкого давления (САОЗ НД и САОЗ ВД) на рециркуляцию не запускаются.

Тяжелая запроектная авария развивается, когда при проектной аварии из-за дополнительных отказов систем безопасности и/или ошибок операторов нарушается функция отвода тепла от активной зоны реактора, что приводит к разогреву и повреждению элементов активной зоны и внутрикорпусных устройств.

В принятом сценарии протекания аварии полагалось, что на момент наступления исходного события реакторная установка работает на мощности 100 %. Исходное событие происходит в конце кампании 6-й топливной загрузки, при этом конец стационарной кампании соответствует максимальному выгоранию твэлов в активной зоне и выбран консервативно с точки зрения выхода продуктов деления и аэрозолей в атмосферу.

При расчетах принималось, что стартовая пороговая концентрация водорода для рекомбинаторов системы удаления водорода принималась равной 2 об.%. Для всех рекомбинаторов задавалось снижение производительности на 10 % вследствие возможного отравления каталитических пластин.

В результате выброса теплоносителя в течь происходит уменьшение массы теплоносителя в реакторе и, как следствие, опорожнение компенсатора давления, снижение давления в 1-м контуре и вскипание теплоносителя. Ввиду образования течи из 1-го контура происходит срабатывание аварийной защиты, после чего мощность реактора падает до уровня остаточных энерговыделений.

После остановки турбины отвод тепла осуществляется через 2-й контур системами, сбрасывающими пар в атмосферу: быстродействующей редуцирующей установкой сброса пара в атмосферу (БРУ-А), системой пассивного отвода тепла через парогенераторы (СПОТ ПГ). Предполагается, что работают три канала СПОТ ПГ, подключенные к парогенераторам № 1, 2, 4, при этом канал системы № 3 не работает.

Временное улучшение условий охлаждения активной зоны и рост уровня теплоносителя в реакторе происходит за счет начала подачи относительно холодной борированной воды из гидроемкостей системы аварийного охлаждения активной зоны реактора (САОЗ) в 1-й контур. В расчетах моделируется работа всех четырех гидроемкостей системы. После прекращения подачи воды из гидроемкостей происходит снижение уровня теплоносителя в активной зоне, и по мере выпаривания воды и осушения активной зоны начинается постепенный рост температур оболочек твэлов.

После достижения температуры 650 °С над активной зоной температура оболочек твэлов достигает значения 1200 °С и начинается пароциркониевая реакция с генерацией водорода. Происходит нарушение герметичности циркониевых оболочек и выход летучих продуктов деления в 1-й контур. Далее начинается нагрев и происходит расплавление направляющих каналов и поглощающих стержней. Расплав (сталь, карбид бора, циркониевые оболочки твэлов) стекает в нижнюю часть активной зоны. После этого расплав взаимодействует с остатками воды в нижней части корпуса реактора, происходит диспергирование расплава (на металлический и оксидный слой), его доокисление и дополнительный выход пара и водорода через разрыв в паровоздушную среду под защитной оболочкой.

На рассматриваемом типе АЭС реализована концепция удержания расплава в ловушке тигельного типа, которая размещается под днищем корпуса реактора. Устройство локализации расплава состоит из охлаждаемого водой стального корпуса, внутренний объем которого частично заполнен оксидным и металлическим жертвенным материалом.

После разрушения корпуса реактора расплав порционно поступает в ловушку. Первая порция состоит преимущественно из стальных конструкций активной зоны и внутрикорпусных устройств с примесью циркония и урана. С некоторой задержкой после выхода первых металлических порций начинают поступать порции расплава, содержащие оксиды и корпусную сталь. При этом в устройстве локализации расплава формируется двуслойная ванна расплава. После ряда химических реакций происходит инверсия расплавов, в результате которой слой стали перемещается в донную часть ванны, а расплав тяжелых оксидов, смешавшись со слоем образовавшихся шлаков, образует верхний слой расплава.

Прогнозируется выход практически всего кориума в устройство локализации расплава. Охлаждение кориума обеспечивается теплоотводом от корпуса ловушки к воде, заливаемой в бетонную шахту. После завершения перемещения основной массы кориума из корпуса реактора в устройство локализации вода подается также непосредственно на поверхность расплава.

Использование ловушки расплава исключает взаимодействие кориума с конструкционным бетоном шахты реактора и, следовательно, приводит к уменьшению выбросов водорода под защитную оболочку.

Хронологическая последовательность событий при протекании аварии с течью при отрыве трубопровода впрыска компенсатора давления (Ду179) с отказом активной части САОЗ представлена в табл. 2.

Таблица 2. Хронология протекания рассматриваемой тяжелой запроектной аварии
 Table 2. Chronology of severe beyond design basis accident

Время, с	Событие	Условия запуска, условия блокировки или инициирующее воздействие
–	Конец кампании 6-й топливной загрузки. Реакторная установка работает на номинальной мощности $N_{НОМ}$	Исходное состояние
0,0	Течь Ду179 из холодной нитки 3-й петли	Исходное событие
0,9	Формирование сигнала аварийной защиты	По факту снижения давления на выходе из реактора менее 15,20 МПа и мощности реактора более 75 % от номинальной $N_{НОМ}$
2,9	Переход мощности активной зоны на уровень остаточных энерговыделений	Падение в активную зону всех поглощающих нейтроны стержней, изменение плотности теплоносителя в активной зоне за счет вскипания
5,9	Закрытие стопорных клапанов турбины	Наличие сигнала аварийной защиты
0,9	Отключение всех главных циркуляционных насосов, начало их выбега. Формирование сигнал на: запуск насосов САОЗ ВД и НД (отказ всех насосов по условиям сценария); срабатывание БРУ-А всех парогенераторов в режиме поддержания скорости расхолаживания 30 °С/ч	По факту прохождения сигнала «Уменьшение запаса до кипения в любой из горячих ниток петель ниже 8 °С»
26,0	Опорожнение компенсатора давления	Течь первого контура
38,1	Формирование сигнала на открытие «больших» клапанов СПОТ ПГ	По факту совпадения сигналов: уменьшение запаса до кипения в любой из горячих ниток петель ниже 8 °С; температура теплоносителя в горячих нитках петель более 150 °С; отсутствие расхода в напорных линиях и линиях рециркуляции трех из четырех насосов САОЗ ВД
123,1	Выход СПОТ ПГ на полную мощность	Через 85 с после прохождения сигнала
174,4	Срабатывание клапанов гидроемкостей САОЗ, начало подачи в верхнюю и нижнюю камеры реактора	Сигнал «Давление в реакторе менее 5,9 МПа»
420,3	Отключение гидроемкостей САОЗ	Уменьшение уровня в гидроемкостях менее 1,25 м
457,7	Осушение верхней части реактора – снижение уровня в реакторе ниже уровня входных патрубков	Диагностируется по показаниям датчиков на уровне входных патрубков
1282	Превышение температуры над активной зоной 400 °С	Отсутствие подпитки 1-го контура
1472	Превышение температуры над активной зоной 650 °С	Отсутствие подпитки 1-го контура
1635	Начало генерации водорода	Разогрев активной зоны
1724	Интенсификация парциркуниевой реакции и превышение температуры оболочек твэлов проектного предела	Превышение температуры оболочек твэлов 1200 °С
1912	Открытие оператором всех клапанов импульсно-предохранительных устройств компенсатора давления	Превышение температуры над активной зоной 400 °С
2015	Разрушение пленки ZrO_2 оболочек твэлов	Превышение температуры оболочек 2250 °С
2400	Действия оператора по управлению: закрытие клапанов БРУ-А; отключение работающих СПОТ ПГ	По факту прохождения сигнала «угроза тяжелой аварии» с учетом невмешательства оператора в течение 1800 с и задержкой на действия оператора 600 с
3044	Полное осушение активной зоны	Отсутствие подпитки 1-го контура
3004	Образование в активной зоне локальных ванн расплава. Превышение температуры плавления топлива в разрушенной области активной зоны	Превышение температуры топлива 2840 °С
4266	Поступление материалов разрушенной части активной зоны и элементов внутрикорпусных устройств	Разогрев активной зоны
4495	Обрушение нижней опорной плиты	Плавление и обрушение активной зоны
5695	Выход расплава на корпус реактора	Плавление и обрушение активной зоны
6648	Разрушение корпуса реактора, выход первой порции расплава в устройство локализации расплава	Разрушение корпуса реактора
13 634	Выход более 90 % массы диоксида урана в устройство локализации расплава	Разрушение корпуса реактора

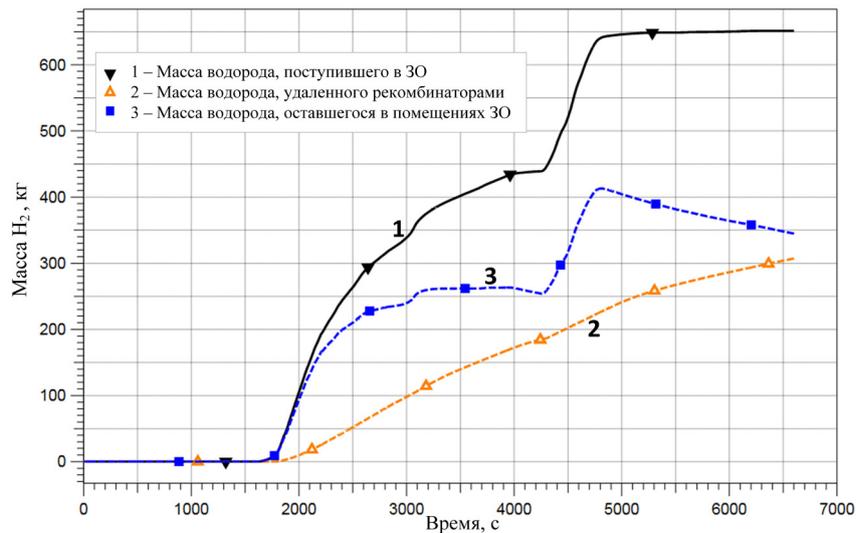


Рис. 4. Масса поступившего (кривая 1), рекомбинированного (кривая 2) и накопленного (кривая 3) водорода в помещениях защитной оболочки

Fig. 4. Mass of released (curve 1), recombined (curve 2) and accumulated (curve 3) hydrogen in the containment compartments

Расчетная эффективность системы удаления водорода из защитной оболочки представлена на рис. 4. На графике показаны интегральные выходы водорода в помещения здания реактора, масса рекомбинированного водорода и масса водорода, оставшегося в помещениях. Видно, что за расчетное время протекания аварии (6 600 с, или 1 ч 50 мин) система рекомбинирует приблизительно около 45 % массы водорода, поступившего под защитную оболочку через разрыв.

Максимальные объемные концентрации водорода (до 17 об.%, см. рис. 5, а) достигаются в расчетных объемах аварийного бокса парогенераторов (КО 8-1, 8-2, 8-3 и 8-4) в моменты пиковых выбросов водорода через разрыв, которые соответствуют периодам интенсивного поступления паро-водородной газовой смеси из реакторной установки: временные промежутки, когда в результате протекания парациркониевой реакции происходит разрушение оболочек твэлов (2 000 с, или 33 мин), а также плавление и обрушение активной зоны, выход расплава на корпус реактора (4 500 с, или 1 ч 15 мин). Расчеты показывают, что в другом неаварийном боксе парогенераторов (расположение КО 9-3 см. на рис. 3, а) максимальная концентрация водорода составляет 8,8 об.% (рис. 5, б). В остальных отсеках защитной оболочки эта величина не превышает 5 об.% за весь расчетный период.

В качестве примера покажем концентрационное распределение водорода в отсеках над баками-прямыми (рис. 5, с) и на участке главных циркуляционных насосов (рис. 5, д). Видно, что после 5 000 с (1 ч 23 мин) с момента начала аварии в помещениях наблюдается снижение и выравнивание концентраций водорода по всему воздушному объему под защитной оболочкой, происходящее за счет активного перемешивания среды и работы каталитических рекомбинаторов водорода.

Для анализа возможных режимов горения (дефлаграции/детонации) водородсодержащей смеси в атмосфере под защитной оболочкой АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при протекании рассматриваемой ЗПА нами использовалась программа СОСPLOT (графическая утилита ПС СОСОSYS). На трехкомпонентной диаграмме Шапиро–Моффетти были построены характерные точки объемных концентраций газов в различных отсеках защитной оболочки за все расчетное время. Данные точки показывают объемную долю каждого компонента газовой смеси в конкретном контрольном объеме в фиксированный момент времени.

На рис. 6 приведены полученные в результате анализа характерные точки для различных отсеков: над баками-прямыми (рис. 6, а), на участке главных циркуляционных насосов (рис. 6, б), в подкупольном пространстве (рис. 6, с), в неаварийном (рис. 6, д) и в аварийном боксах парогенераторов (рис. 6, е, ф).

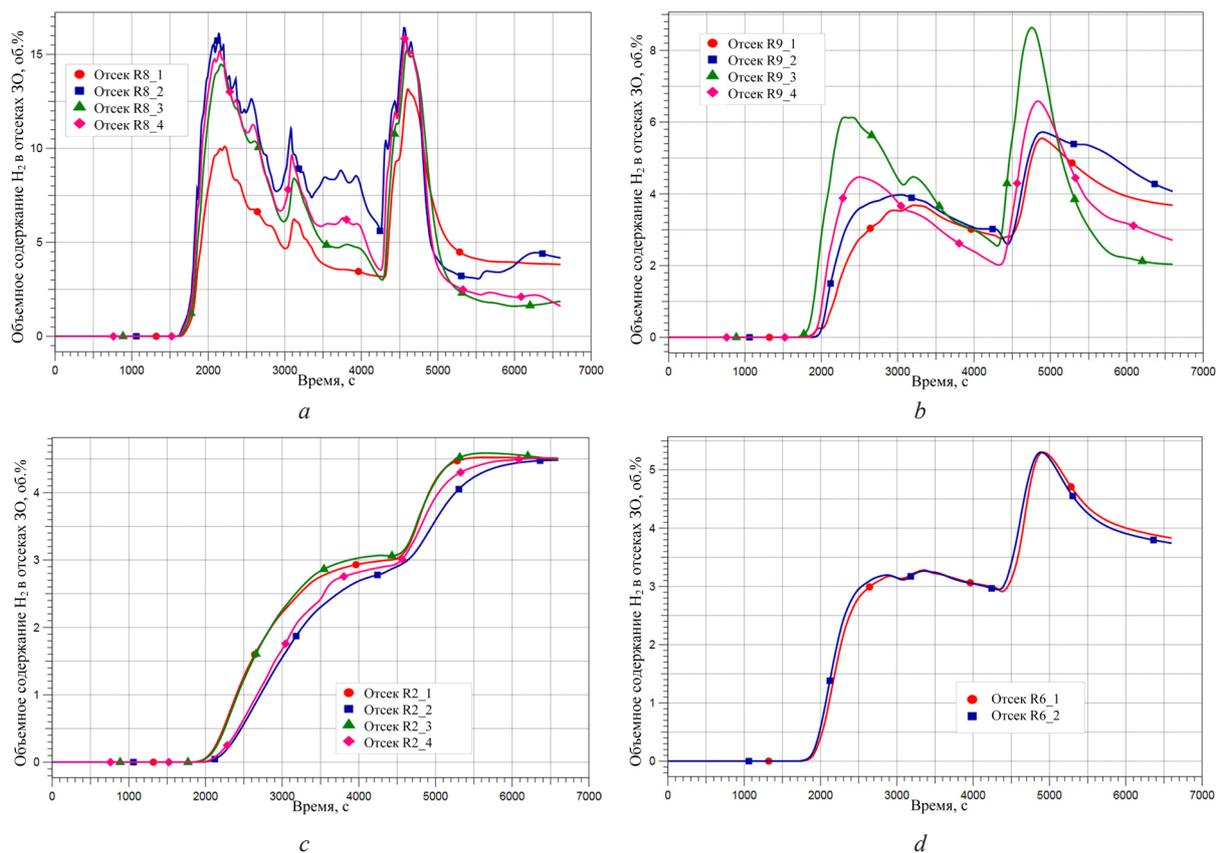


Рис. 5. Объемные концентрации водорода в различных помещениях защитной оболочки:
 а – в аварийном боксе парогенераторов; б – во втором неаварийном боксе парогенераторов;
 с – над баками-приямками; д – на участке главных циркуляционных насосов
 Fig. 5. Volume concentrations of hydrogen mixture in various compartments of the containment:
 а – in the emergency box of steam generators; б – in the second non-emergency box of steam generators;
 с – above sump tanks; д – at the section of the main circulation pumps

На представленных трехкомпонентных графиках видно, что точки, характеризующие состояние атмосферы, для всех рассчитанных контрольных объемов лежат вне области А (см. рис. 1, а), то есть возможность детонации водородсодержащей смеси на протяжении всего расчетного периода исключена. Результаты расчетов показывают, что в область дефлаграции (зона В на рис. 1, а) попадает только КО 8-2 (рис. 6, е), относящийся к аварийному боксу парогенераторов, где происходит разрыв трубопровода и выделяется основная масса пара и водорода. На рис. 6, ф диаграмма Шапиро–Моффетти для указанного контрольного объема увеличена в масштабе и на ней отмечены соответствующие временные точки.

На рис. 7 показаны временные зависимости объемной концентрации пара и водорода в аварийном боксе парогенераторов – в КО 8-2, на рис. 8 – изменение давления и температуры парогазовой среды в данном контрольном объеме.

На начальном этапе развития аварии в КО 8-2 наблюдается резкий рост объемной концентрации пара, давления и температуры, связанный с выбросом через разрыв трубопровода большого количества теплоносителя 1-го контура, который мгновенно вскипает в атмосфере под защитной оболочкой.

Далее количество пара снижается до момента времени $T_8 \sim 4\,250$ с (1 ч 11 мин) за счет конденсации на поверхностях «холодных» строительных конструкций и оборудования, а также вследствие эффективной работы СПОТ ЗО. С учетом того, что спринклерная система имеет общие обеспечивающие системы с активной частью САОЗ, то вероятность того, что спринклерная система сохранит работоспособность при отказе всех четырех каналов САОЗ, крайне мала, поэтому принят отказ на включение спринклерной системы, и конденсации пара на распыливаемых каплях воды не происходит.

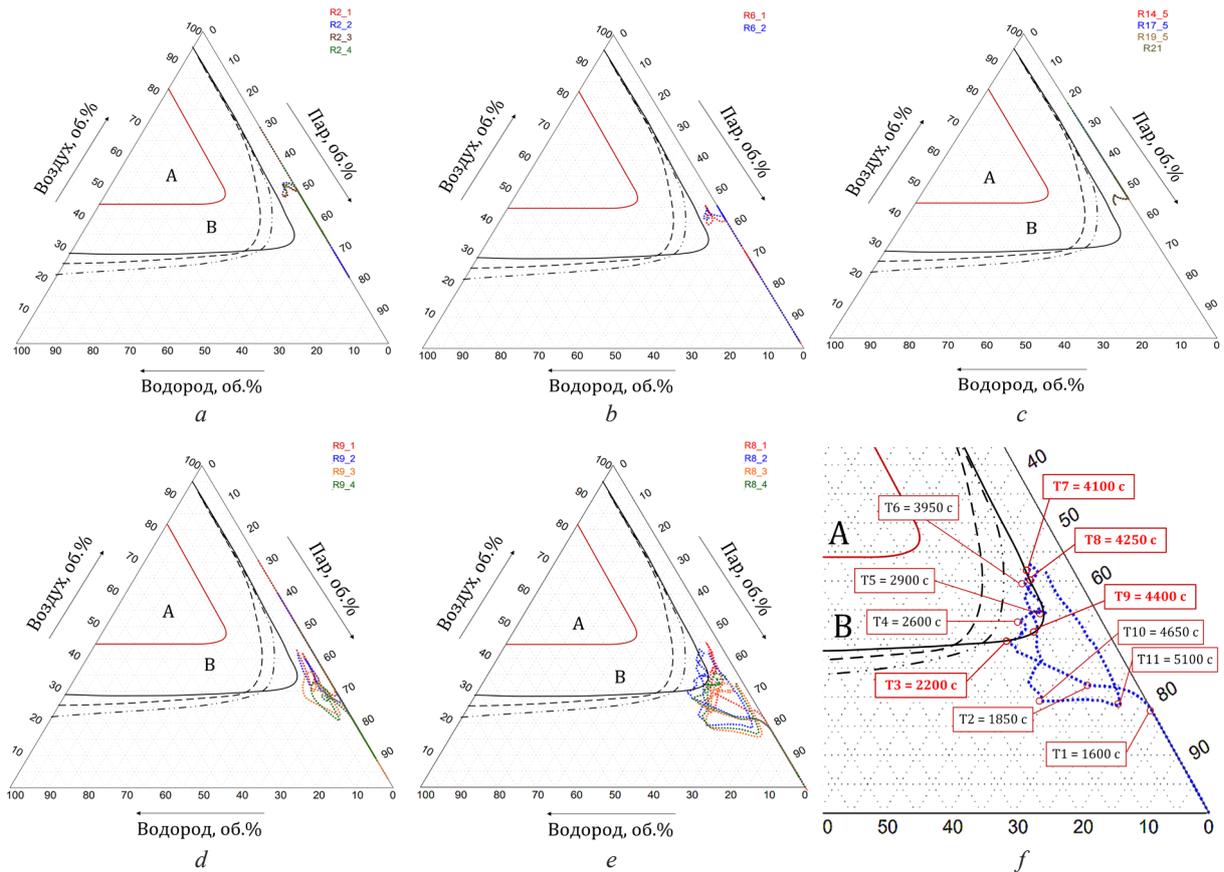


Рис. 6. Изменение во времени на диаграмме горения Шапиро–Мoffетти положения точки параметров водородсодержащей смеси в различных помещениях защитной оболочки: *a* – над баками-приямками; *b* – на участке главных циркуляционных насосов; *c* – в подкупольном пространстве; *d* – во втором неаварийном боксе парогенераторов; *e* – во всех контрольных объемах аварийного бокса парогенераторов; *f* – в контрольном объеме аварийного бокса парогенераторов, в котором моделируется выход пара и водорода (КО 8-2)

Fig. 6. Change in time on the Shapiro–Moffette combustion diagram of the points of parameters of hydrogen-containing mixture in various compartments of the containment: *a* – over sump tanks; *b* – at the section of the main circulation pumps; *c* – in dome compartment; *d* – in the non-emergency box of steam generators; *e* – in all control volumes of the emergency box of steam generators; *f* – in the control volume (8-2) of the emergency box of steam generators, in which the release of steam and hydrogen is simulated

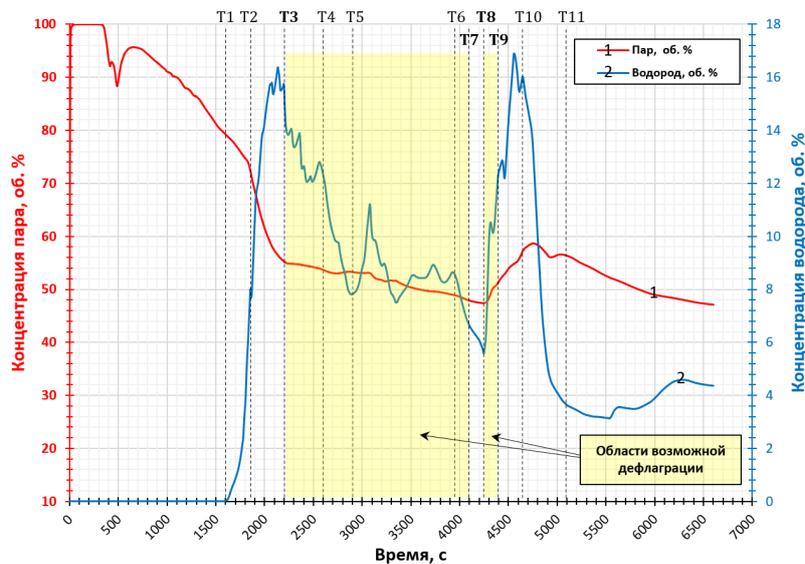


Рис. 7. Концентрации пара (кривая 1) и водорода (кривая 2) в аварийном боксе парогенераторов (контрольный объем 8-2)
 Fig. 7. Steam (curve 1) and hydrogen (curve 2) concentrations in the emergency box of steam generators (control volume 8-2)

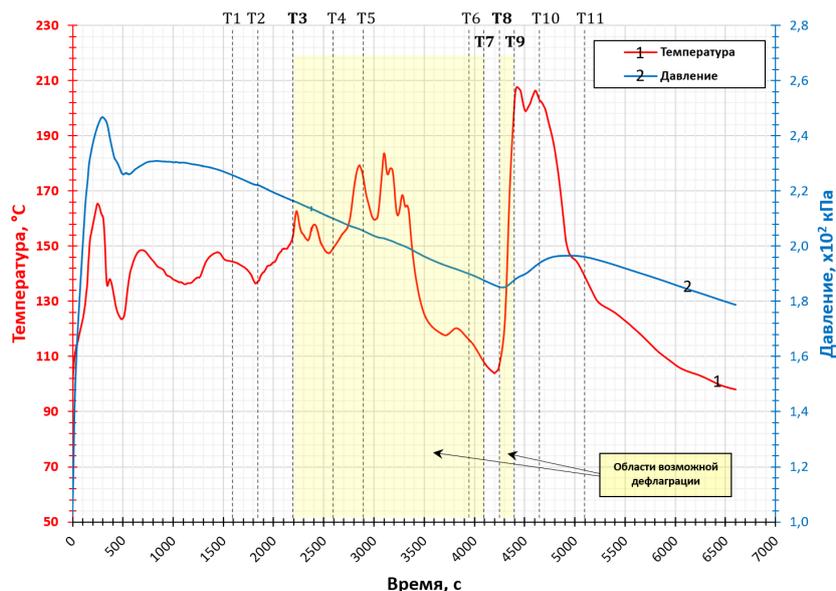


Рис. 8. Температура (кривая 1) и давление (кривая 2) парогазовой среды в аварийном боксе парогенераторов (контрольный объем 8-2)

Fig. 8. Atmosphere temperature (curve 1) and pressure (curve 2) in the emergency box of steam generators (control volume 8-2)

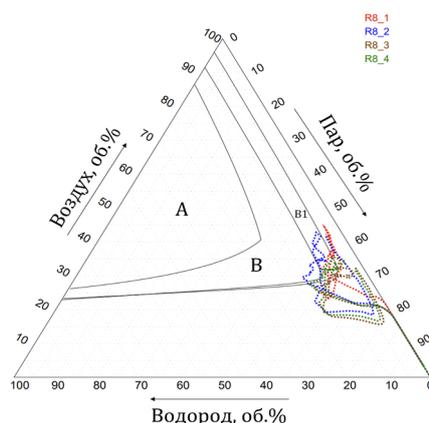


Рис. 9. Изменение во времени положения точки параметров водородсодержащей смеси в аварийном боксе парогенераторов на диаграмме горения Шапиро–Моффетти, используемой в программном средстве COCOSYS

Fig. 9. Change in time of the point of parameters of the hydrogen-containing mixture in the emergency box of steam generators on the Shapiro–Moffette combustion diagram used in the COCOSYS code

В момент времени $T_1 \sim 1\,500$ с (25 мин) начинается интенсивная пароциркониевая реакция, объемная концентрация водорода в КО 8-2 быстро возрастает почти до 17 об.%, однако ввиду большого количества пара (инертизация атмосферы паром) даже при пиковой концентрации водорода дефлаграция исключена.

Область возможной дефлаграции водородсодержащей смеси начинается с момента $T_3 \sim 2\,200$ с (37 мин), так как количество пара становится ниже 55 об.% с концентрацией водорода выше 14 об.%

Первая область возможной дефлаграции заканчивается в точке $T_7 \sim 4\,100$ с (1 ч 8 мин), когда количество водорода за счет активного перемешивания водородсодержащей среды и работы рекомбинаторов водорода опускается ниже 7 об.% с относительно высоким содержанием пара ~ 48 об.%

Вторая область возможной дефлаграции с момента $T_8 \sim 4\,250$ с (1 ч 11 мин) образуется вследствие того, что расплав, образовавшийся в реакторе, стекает в нижнюю часть актив-

ной зоны и взаимодействует с остатками воды в нижней части корпуса реактора, что приводит к повторному быстрому росту количества водорода в КО 8-2. Однако во временной точке T9 ~ 4 400 с (1 ч 13 мин) вторая область заканчивается, так как указанный процесс сопровождается также выделением пара, что снижает возможность попадания в область В диаграммы Шапиро–Моффетти даже в момент пиковой концентрации водорода. После точки T10 ~ 4 650 с (1 ч 18 мин) начинается медленное снижение концентрации пара с существенно более быстрым уменьшением количества водорода, тем самым дальнейшая возможность дефлаграции водородсодержащей смеси в паровоздушной среде аварийного отсека исключается.

Необходимо отметить, что в качестве критериев водородной безопасности и возможных режимов горения смеси в ПС COCOSYS по умолчанию вместо классической диаграммы Шапиро–Моффетти (см. рис. 1, а) [13] используется трехкомпонентная (см. рис. 1, б) [15]. При сравнении данных диаграмм видно, что используемая в ПС COCOSYS диаграмма имеет более консервативную зону детонации, а также в ней присутствует дополнительная зона медленной дефлаграции (желтая зона, см. рис. 1, б).

Если на диаграмме Шапиро–Моффетти, используемой в ПС COCOSYS, построить характерные точки водородсодержащей смеси для аварийного бокса парогенераторов (рис. 9), то в зону быстрой дефлаграции В попадает только КО 8-2 (в котором задается выход водорода и пара через разрыв), все остальные контрольные объемы, моделирующие аварийный бокс парогенераторов, попадают в зону медленной дефлаграции В1. А возможность детонации смеси и при использовании для анализа взрывобезопасности диаграммы горения, применяемой по умолчанию в ПС COCOSYS, отсутствует.

Заключение. С использованием программного средства COCOSYS проведена расчетная оценка водородной безопасности АЭС с реактором типа ВВЭР-1200/В-491 при протекании тяжелой запроектной аварии с течью Ду179 с наложением отказа активной части системы аварийного охлаждения активной зоны реактора.

Результаты расчетов показали, при заданных условиях детонация водородсодержащих смесей под защитной оболочкой исключается, дефлаграция возможна только в боксе парогенераторов, в котором происходит разрыв трубопровода.

Таким образом, эффективность функционирования системы удаления водорода из защитной оболочки в рекомбинаторах с помощью каталитической рекомбинации принимается достаточной. Водородная взрывобезопасность на атомной станции согласно «Правилам обеспечения водородной взрывозащиты на атомных электростанциях с реакторами типа ВВЭР» считается обеспеченной.

Список использованных источников

1. Анализ причин и последствий аварии на АЭС Fukushima как фактор предотвращения тяжелых аварий в корпусных реакторах / В. И. Скалозубов [и др.]; под ред. В. И. Скалозубова. – Чернобыль: Ин-т проблем безопасности АЭС НАН Украины, 2012. – 280 с.
2. Обеспечение водородной безопасности на атомных электростанциях с водоохлаждаемыми реакторными установками. Современное состояние проблемы / И. А. Кириллов [и др.] // Ядерная и радиационная безопасность. – 2017. – № 2 (84). – 26–37.
3. Meynet, N. Numerical study of hydrogen ignition by passive autocatalytic recombiners / N. Meynet, A. Bentaib // Nucl. Technol. – 2012. – Vol. 178, № 1. – P. 17–28. <https://doi.org/10.13182/NT12-A13544>
4. Experimental study of effect of ambient flow condition on the performance of as passive autocatalytic recombiner / Z. Liang [et al.] // Nucl. Eng. Design. – 2016. – Vol. 301. – P. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.03.005>
5. A large-scale study on the effect of ambient conditions on hydrogen recombiner-induced ignition / L. Gardner [et al.] // Int. J. Hydrog. Energy. – 2021. – Vol. 46, iss. 23. – P. 12594–12604. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.132>
6. Bentaib, A. Overview on hydrogen risk research and development activities: methodology and open issues / A. Bentaib, N. Meynet, A. Bleyer // Nucl. Eng. Technol. – 2015. – Vol. 47, iss. 1. – P. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>
7. Hydrogen removal from LWR containments by catalytic-coated thermal insulation elements (THINCAT) / K. Fischer [et al.] // Nucl. Eng. Design. – 2003. – Vol. 221, iss. 1–3. – P. 137–149. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00348-5](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00348-5)
8. Sprays in Containment: Final Results of the SARNET Spray Benchmark / J. Malet [et al.] // Nucl. Eng. Design. – 2011. – Vol. 241, iss. 6. – P. 2162–2171. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.03.016>
9. Investigation of PAR Behavior in the REKO-4 Test Facility / B. Simon [et al.] // 20th Int. Conf. on Nuclear Engineering and the ASME Conference. – 2012. – Vol. 2. – P. 345–350. <https://doi.org/10.1115/ICONE20-POWER2012-54234>

10. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments / S. Gupta [et al.] // *Nucl. Eng. Design.* – 2015. – Vol. 294. – P. 183–201. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.09.013>
11. Project MITHYGENE [Electronic resource] // IRSN. – Mode of access: <https://www.irsn.fr/recherche/projet-mithygene>. – Date of access: 03.06.2024.
12. Status report on hydrogen management and related computer codes / NEA, OECD Publishing. – Paris, 2015. – 211 p.
13. Shapiro, Z. M. Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident: Report WAPD-SC-545 [Electronic resource] / Z. M. Shapiro, T. R. Moffette. – Pittsburgh: Westinghouse Electric Corp., 1957. – Mode of access: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1024816/m2/1/high_res_d/4327402.pdf. – Date of access: 07.07.2023.
14. Анализ и устранение замечаний Ростехнадзора к пассивным каталитическим рекомбинаторам водорода для энергоблоков ВВЭР / А.В. Михальчук [и др.] // Краткие результаты научно-технической деятельности ВНИИАЭС за 2016 год: сб. работ / АО «ВНИИАЭС»; редкол.: Л. М. Воронин (гл. ред.) [и др.]. – М.: ВНИИАЭС, 2017. – С. 17–26.
15. Kumar, R. K. Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluent mixtures / R. K. Kumar // *J. Fire Sci.* – 1985. – Vol. 3, iss. 4. – P. 245–262. <https://doi.org/10.1177/073490418500300402>

References

1. Skalozubov V. I., Kljuchnikov A. A., Vashhenko V. N., Jarovoj S. S. *Analysis of the Causes and Consequences of the Accident at the Fukushima NPP as a Factor in the Prevention of Severe Accidents in Pressurized Reactors.* Chernobyl, Institute of NPP Safety Problems of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2012. 280 p. (in Russian).
2. Kirillov I. A., Kharitonova N. L., Sharafutdinov R. B., Khrennikov N. N. Hydrogen safety for nuclear power plants with light water reactor units. Current state of the problem. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety*, 2017, no. 2, pp. 26–37 (in Russian).
3. Meynet N., Bentaib A. Numerical study of hydrogen ignition by passive autocatalytic recombiners. *Nuclear Technology*, 2012, vol. 178, no. 1, pp. 17–28. <https://doi.org/10.13182/NT12-A13544>
4. Liang Z., Gardner L., Clouthier T., Thomas B. Experimental study of effect of ambient flow condition on the performance of as passive autocatalytic recombiner. *Nuclear Engineering and Design*, 2016, vol. 301, pp. 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2016.03.005>
5. Gardner L., Liang Z., Clouthier T., MacCoy R. A large-scale study on the effect of ambient conditions on hydrogen recombiner-induced ignition. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021. vol. 46, iss. 23, pp. 12594–12604. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.06.132>
6. Bentaib A., Meynet N., Bleyer A. Overview on hydrogen risk research and development activities: methodology and open issues. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, vol. 47, iss. 1, pp. 25–32. <https://doi.org/10.1016/j.net.2014.12.001>
7. Fischer K., Broeckerhoff P., Ahlers G., Gustavsson V., Herranz L., Polo J., Dominguez T., Royl P. Hydrogen removal from LWR containments by catalytic-coated thermal insulation elements (THINCAT). *Nuclear Engineering and Design*, 2003, vol. 221, iss. 1–3, pp. 137–149. [https://doi.org/10.1016/S0029-5493\(02\)00348-5](https://doi.org/10.1016/S0029-5493(02)00348-5)
8. Malet J., Blumenfeld L., Arndt S., Babic M., Bentaib A., Dabbene F., Kostka P. [et al.]. Sprays in Containment: Final Results of the SARNET Spray Benchmark. *Nuclear Engineering and Design*, 2011, vol. 241, iss. 6, pp. 2162–2171. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2011.03.016>
9. Simon B., Reinecke E. A., Klauck M., Heidelberg D., Allelein H. J. Investigation of PAR Behavior in the REKO-4 Test Facility. *20th International Conference on Nuclear Engineering and the ASME Conference*, 2012, vol. 2, pp. 345–350. <https://doi.org/10.1115/ICONE20-POWER2012-54234>
10. Gupta S., Schmidt E., Laufenberg B. von, Freitag M., Poss G., Funke F., Weber G. THAI test facility for experimental research on hydrogen and fission product behavior in light water reactor containments. *Nuclear Engineering and Design*, 2015, vol. 294, pp. 183–201. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.09.013>
11. Project MITHYGENE. IRSN. Available at: <https://www.irsn.fr/recherche/projet-mithygene> (accessed 3 June 2024) (in French).
12. NEA. *Status report on hydrogen management and related computer codes.* Paris, OECD Publishing, 2015. 211 p.
13. Shapiro Z. M., Moffette T. R. *Hydrogen flammability data and application to PWR loss-of-coolant accident: Report WAPD-SC-545.* Pittsburgh, Westinghouse Electric Corp., 1957. Available at: https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc1024816/m2/1/high_res_d/4327402.pdf (accessed 7 July 2023).
14. Mihal'chuk A. V., Solov'jov S. L., Solov'ev B. S., Stepanov V. S., Fedorchenko S. V., Sedov M. K. Analysis and elimination of remarks of Rostekhnadzor to passive catalytic hydrogen recombiners for VVER power units. *Kratkie rezul'taty nauchno-tehnicheskoi deyatel'nosti VNIAES za 2016 god: sb. rabot* [Brief results of scientific and technical activities of VNIAES for 2016: Proc. VNIAES]. Moscow, VNIAES, 2017, pp. 17–26 (in Russian).
15. Kumar R. K. Flammability limits of hydrogen-oxygen-diluent mixtures. *Journal of Fire Science*, 1985, vol. 3, iss. 4, pp. 245–262. <https://doi.org/10.1177/073490418500300402>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-166-176>

УДК 621.384.63+539.172



Оригинальная статья

С. Д. Бринкевич^{1,2*}, Д. И. Бринкевич¹, А. И. Киевицкая³, А. Н. Кийко⁴, И. А. Ковалёв⁵

¹Белорусский государственный университет,

пр. Независимости, 4, 220030, Минск, Республика Беларусь

²ООО «Мой медицинский центр – высокие технологии»,

Октябрьский пр., 122, 188640, Всеволожск, Ленинградская область, Российская Федерация

³Международный государственный институт имени А. Д. Сахарова

Белорусского государственного университета,

ул. Долгобродская 23/1, 220070, Минск, Республика Беларусь

⁴Белорусский государственный институт метрологии,

Старовиленский тракт, 93, 220053, Минск, Республика Беларусь

⁵Республиканский научно-практический центр онкологии и медицинской радиологии

имени Н. Н. Александрова,

а/г Лесной, 223040, Минский район, Республика Беларусь

АНАЛИЗ НАКОПЛЕНИЯ β -ИЗЛУЧАЮЩИХ РАДИОНУКЛИДОВ В ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ НА ОСНОВЕ ^{18}F С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЦИКЛОТРОНА IVA CYCLONE 18/9 HC

Аннотация. С целью уточнения схемы обращения с радиоактивными отходами исследовано накопление нежелательных β -излучающих радионуклидов (РН) при производстве радиофармпрепаратов на основе ^{18}F с использованием циклотрона IVA CYCLONE 18/9 HC. Показано, что доминирующим примесным РН является тритий, образующийся по реакции $^{18}\text{O}(p, t)^{16}\text{O}$ при облучении воды $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ протонами. Основная доля ^3H (около 95 %) остается в регенерированной воде; 1,6 % от наработанной активности трития уносится из зоны синтеза с газами и парами воды. Содержащие тритий отходы (регенерированная вода во флаконах) при утилизации могут рассматриваться как отходы очень низкого уровня активности. При увеличении времени наработки мишени свыше 2500 мкА·ч усиливаются процессы коррозии/эрозии материалов мишени, что приводит к резкому росту концентрации нежелательных радионуклидов в регенерированной воде, картриджах сорбционной очистки и готовой лекарственной форме. Концентрация трития при этом существенно не возрастает. В β -спектрах регенерированной воды $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ и готового радиофармпрепарата $[^{18}\text{F}]\text{NaF}$, кроме максимума, обусловленного тритием, появляется ряд максимумов как в низко-, так и в высокоэнергетической части спектра. Другие нежелательные β -излучатели накапливаются в воде в результате выщелачивания активированной стенки мишени. Продемонстрирована возможность использования измерений активности трития в воде $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ в качестве индикатора ее повторного обогащения. Показана необходимость контроля содержания примесных β -излучающих РН в промежуточных продуктах, отходах производства и конечном радиофармпрепарате.

Ключевые слова: циклотрон, радиофармпрепараты, $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$, тритий, β -излучающие радионуклиды

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Бринкевич Святослав Дмитриевич* – кандидат химических наук, доцент кафедры радиационной химии и химической технологии Белорусского государственного университета; руководитель направления радиохимии ООО «Мой медицинский центр – высокие технологии». <https://orcid.org/0000-0003-1661-5272>. E-mail: brinkevichSD@bsu.by; Бринкевич Дмитрий Иванович – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры физики полупроводников и наноэлектроники Белорусского государственного университета. E-mail: brinkevich@bsu.by; Киевицкая Анна Ивановна – доктор физико-математических наук, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры ядерной и радиационной безопасности Международного государственного экологического института имени А. Д. Сахарова Белорусского государственного университета. <https://orcid.org/0000-0001-9816-334X>. E-mail: kiyavitskaya@iseu.by; Кийко Александр Николаевич – начальник отдела измерений ионизирующих излучений Белорусского государственного института метрологии. E-mail: kiyko@micasensor.com; Ковалёв Игорь Александрович – заведующий изотопной циклотронно-радиохимической лабораторией Республиканского научно-практического центра онкологии и медицинской радиологии имени Н. Н. Александрова. E-mail: igor.alex.kovalev@gmail.com

Вклад авторов: Бринкевич Святослав Дмитриевич – сбор литературных данных, планирование исследований, сбор и систематизация данных, формулировка выводов, редактирование текста рукописи; Бринкевич Дмит-

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

рий Иванович – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), анализ и обобщение литературных данных, планирование исследований, сбор и систематизация данных, формулировка выводов, написание текста рукописи; *Киевицкая Анна Ивановна* – разработка методологии исследования, обоснование концепции исследования, анализ и обобщение данных литературы, формулировка выводов, редактирование текста рукописи, *Кийко Александр Николаевич* – пробоподготовка образцов для исследований, проведение исследований полученных образцов, анализ и систематизация экспериментальных данных, обобщение результатов исследований, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом; *Ковалев Игорь Александрович* – пробоподготовка образцов для исследований, анализ и систематизация экспериментальных данных, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Анализ накопления β -излучающих радионуклидов в процессе производства радиофармпрепаратов на основе ^{18}F с использованием циклотрона IBA CYCLONE 18/9 HC / С. Д. Бринкевич [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 2. – С. 166–176. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-166-176>

Поступила в редакцию: 10.07.2023

Доработанный вариант: 19.12.2023

Утверждена к публикации: 06.06.2024

Подписана в печать: 12.06.2024.

Original article

Sviatoslav D. Brinkevich^{1,2*}, Dmitrii I. Brinkevich², Hanna I. Kiyavitskaya³, Aliaksandr N. Kiyko⁴, Igor A. Kovalev⁵

¹Belarusian State University,

4, Nezavisimosti Ave., 220030, Minsk, Republic of Belarus

²LLC “My Medical Center – High Technologies”,

122, Oktyabrski Ave., 188640, Vsevolozhsk, Leningrad Region, Russian Federation

³International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University,

23/1, Dolgobrodskaya Str., 220037, Minsk, Republic of Belarus

⁴Belarusian State Institute of Metrology,

93, Starovilenski tract, 220053, Minsk, Republic of Belarus

⁵N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,

agro-town Lesnoy, 223040, Minsk District, Republic of Belarus

ANALYSIS OF THE ACCUMULATION OF β -EMITTING RADIONUCLIDES IN THE PRODUCTION OF RADIOPHARMACEUTICALS BASED ON ^{18}F USING THE IBA CYCLONE 18/9 HC CYCLOTRON

Abstract. In order to clarify the scheme of radioactive waste management, the accumulation of undesirable beta-emitting radionuclides (PH) in the production of radiopharmaceuticals based on ^{18}F using the IBA CYCLONE 18/9 HC cyclotron was investigated. It is shown that the dominant impurity PH is tritium, which is formed by the reaction of $^{18}\text{O}(p, t)^{16}\text{O}$ when water is irradiated with $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ protons. The main proportion of ^3H (about 95%) remains in the regenerated water. 1.6 % of the accumulated tritium activity is carried away from the synthesis zone with gases and water vapor. Tritium-containing waste (regenerated water in vials) can be considered as waste of a very low level of activity during disposal. With an increase in the operating time of the target over $2500 \mu\text{A} \cdot \text{h}$, the processes of corrosion /erosion of target materials increase, which leads to a sharp increase in the concentration of undesirable radionuclides in regenerated water, sorption purification cartridges and the finished dosage form. The concentration of tritium does not increase significantly. In the β -spectra of regenerated water $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ and the finished radiopharmaceutical $^{18}\text{F}]\text{NaF}$, in addition to the maximum due to tritium, a number of maxima appear in both the low- and high-energy parts of the spectrum. Other undesirable β -emitters accumulate in water as a result of leaching of the activated target wall. The possibility of using measurements of tritium activity in water $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ as an indicator of its re-enrichment has been demonstrated. The necessity of controlling the content of impurity beta-emitting PH in intermediate products, production waste and final radiopharmaceutical is shown.

Keywords: cyclotron, radiopharmaceuticals, $^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$, tritium, β -emitting radionuclides

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

Information about the authors: *Sviatoslav D. Brinkevich** – Cand. Sci. (Chemistry), Associate Professor of the Department of Radiation Chemistry and Chemical Technology at Belarusian State University; Head of the Radiochemistry Department of LLC “My Medical Center – High Technologies”. <https://orcid.org/0000-0003-1661-5272>. E-mail: brinkevichSD@bsu.by; *Dmitrii I. Brinkevich* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Leading Researcher at the Department of Semiconductor Physics and Nanoelectronics at Belarusian State University. E-mail: brinkevich@bsu.by; *Hanna I. Kiyavitskaya* – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Nuclear and Radiation Safety at International Sakharov Environmental Institute of Belarusian State University. <https://orcid.org/0000-0001-9816-334X>. E-mail: kiyavitskaya@iseu.by; *Aliaksandr N. Kiyko* – Head of the Ionizing Radiation Measurement Department at Belarusian State Institute of Metrology. E-mail: kiyko@micasensor.com; *Igor A. Kovalev* – Head of the Isotope Cyclotron Radiochemical Laboratory at N. N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus. ORCID. E-mail: igor.alex.kovalev@gmail.com

Contribution of the authors: *Sviatoslav D. Brinkevich* – collection of literary data, research planning, data collection and systematization, formulation of conclusions, editing of the manuscript text; *Dmitrii I. Brinkevich* – substantiation of

the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), analysis and generalization of literary data, research planning, collection and systematization of data, formulation of conclusions, writing the text of the manuscript; *Hanna I. Kiyavitskaya* – development of research methodology, substantiation of the research concept, analysis and generalization of literature data, formulation of conclusions, editing of the manuscript text, *Aliaksandr N. Kiyko* – sample preparation for research, conducting studies of the obtained samples, analysis and systematization of experimental data, generalization of research results, editing of the text of the manuscript, design of the manuscript, work with graphic material; *Igor A. Kovalev* – sample preparation for research, analysis and systematization of experimental data, editing of the text of the manuscript.

For citation: Brinkevich S. D., Brinkevich D. I., Kiyavitskaya H. I., Kiyko A. N., Kovalev I. A. Analysis of the accumulation of β -emitting radionuclides in the production of radiopharmaceuticals based on ^{18}F using the IBA CYCLONE 18/9 HC cyclotron. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 2, pp. 166–176 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-2-166-176>

Received: 10.07.2023

Modified: 19.12.2023

Approved for publication: 06.06.2024

Signed to the press: 12.06.2024.

Введение. Позитронно-эмиссионная томография (ПЭТ) является динамично развивающимся методом ранней диагностики онкологических, неврологических и кардиологических заболеваний, в котором используется внутривенное введение радиофармацевтических препаратов (РФП) на основе позитрон-излучающих короткоживущих радионуклидов с периодом полураспада $t_{1/2} = 10\text{--}120$ мин [1]. Ежегодно в мире выполняется 37–40 млн диагностических процедур ядерной медицины и 7,5 млн радиотерапевтических процедур, а спрос на радиоизотопы ежегодно увеличивается на 5 %. По оценке МАГАТЭ, в отделениях ядерной медицины во всем мире работают более 100 тыс. человек [2]. Чтобы обеспечить цикл производства РФП, циклотроны и лаборатории по производству размещаются на месте использования таких препаратов – в больницах, центрах по распределению медицинских препаратов, диагностических центрах и т. п. Это обстоятельство обуславливает резкое ужесточение требований по радиационной безопасности и обращению с радиоактивными отходами (РАО), возникающими в результате таких работ. Интерес к диагностике безопасности проведения ПЭТ в последние годы проявляют Международное агентство по атомной энергии, страны ЕЭС, а также США, Россия и др. [3–7].

Наиболее распространенным радионуклидом для ПЭТ-диагностики является ^{18}F , который получают при облучении протонами с энергией 9–20 МэВ воды (H_2^{18}O), обогащенной по ^{18}O до 95–97 % на циклотроне IBA CYCLONE 18/9 HC. Накопление целевого нуклида происходит вследствие реакции $^{18}\text{O}(p, n)^{18}\text{F}$, при этом также протекает реакция $^{18}\text{O}(p, t)^{16}\text{O}$ с пороговой энергией 3,91 МэВ [8], продуктом которой является тритий. ^3H также образуется при взаимодействии протонов с атомами входного окна (Fe, Co, Ni) и тела мишени, однако сечения этих реакций невелики ($\leq 10^{-3}$ барн), поэтому вероятность поступления трития в облучаемую H_2^{18}O вследствие такого процесса низка [9]. Тритий является чистым β -излучателем с $E_{\beta \text{ max}} = 18,58$ кэВ и периодом полураспада $t_{1/2} = 12,5$ года. Он не может быть детектирован большинством дозиметров, поскольку γ -излучения при его распаде не наблюдаются.

Большинство γ -излучающих радионуклидов (РН), детектированных при производстве РФП для ПЭТ, являются также β -излучателями [10], причем энергия их излучения варьируется в широких пределах – вплоть до ~ 900 кэВ. Требования к жидким β -излучающим РАО существенно более жесткие, чем к γ -излучателям. Так, согласно Санитарным нормам и правилам «Требования к радиационной безопасности» (утверждены Постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 28 декабря 2012 № 213), β -излучающие отходы относятся к радиоактивным отходам при удельной активности 0,1 Бк/г. Указанные обстоятельства обуславливают необходимость контроля содержания β -излучающих РН в промежуточных продуктах, отходах производства и конечном РФП. Кроме того, требуется мониторинг рабочих помещений ПЭТ-центра с целью оценки доз, получаемых как персоналом, так и пациентами [8, 9]. Сведения о β -излучающих РАО в литературе весьма ограничены. Имеется только ряд работ [8, 11–14] по накоплению трития, а по отдельным β -излучателям сведения отсутствуют. Кроме того, следует учитывать, что накопление трития зависит от условий облучения в достаточно широких пределах [8, 13–15]. Указанные обстоятельства определили актуальность работы.

Цель работы – выполнить анализ накопления нежелательных β -излучающих радионуклидов при производстве различных РФП на основе ^{18}F , определить степень радиационной безопасности при производстве радиофармпрепаратов на основе ^{18}F с использованием циклотрона ИВА Cyclone 18/9 НС и уточнить схему обращения с радиоактивными отходами.

Методика измерений. Нарботка ^{18}F осуществлялась на водной мишени циклотрона ИВА Cyclone 18/9 НС [8]. Контроль содержания β -излучающих радионуклидов проводился с использованием автоматического жидкостного сцинтилляционного спектрометра с TDCR регистрацией HIDEX 300 SL и гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1 315. Для HIDEX 300 SL энергетический диапазон составил 0–2 МэВ по β -частицам, эффективность – более 70 % для трития и более 95 % для ^{14}C . Средний фон для β -частиц – 9 имп/мин. Использовали коммерчески доступный жидкий сцинтиллятор на основе толуола Ultima GoldTM. Навески исследуемых растворов объемом ~ 1,0 мл взвешивали с точностью до 10^{-5} г. Объем жидкого сцинтиллятора составлял 19 мл на каждый счетный образец. Пробы объемом 1 мл разводились в 19 мл жидкого сцинтиллятора, далее измерительный образец выдерживался в течение 12 ч при атмосферном давлении и комнатной температуре в темном помещении. Время измерения β -спектра – 1000 с. Для МКС-АТ1 315 диапазон энергий бета-излучения был равен 0,15–3,5 МэВ. Средний фон для β -частиц – 270 имп/мин, чувствительность для ^{90}Sr 0,03л – $3,5 \cdot 10^{-3}$ имп · л/(с · Бк). Вследствие высокой активности образцов измерения проводили не менее чем через 2 сут после облучения.

Определение активности γ -излучающих радионуклидов выполняли с использованием спектрометра на особо чистом германии: детекторная система GEM40-83/DSPEC jr 2.0; энергетический диапазон 14,5–2911,4 кэВ; разрешение 0,182 кэВ/канал и гамма-бета-спектрометра МКС-АТ1 315. Навеску с исследуемым раствором объемом ~ 1,0 мл взвешивали с точностью до 10^{-5} г и затем устанавливали в держатель для контрольного источника. Время измерения γ -спектра составляло 600 с, время измерения образцов малой активности – 3 600 с.

Экспериментальные результаты и их обсуждение. Установлено, что при облучении новой («чистой») мишени в β -спектрах облученной [^{18}O]H₂O после хранения в течение 3 мес. наблюдается один пик, обусловленный излучением трития (рис. 1). Для сравнения на рис. 1 также приведены спектры калибровочных растворов (^3H , ^{14}C , ^{90}Sr + ^{90}Y). Содержание трития в облученной воде прямо пропорционально длительности облучения и величине ионного тока. Соотношение активностей трития и ^{18}F в облученной H₂¹⁸O воде $A_{\text{H}^3}/A_{\text{F}^{18}}$ определяется в основном энергией протонов и при использовании циклотрона ИВА CYCLONE 18/9 НС с энергией 18 МэВ составляет $A_{\text{H}^3}/A_{\text{F}^{18}} = 1,0 \cdot 10^{-6}$ [11].

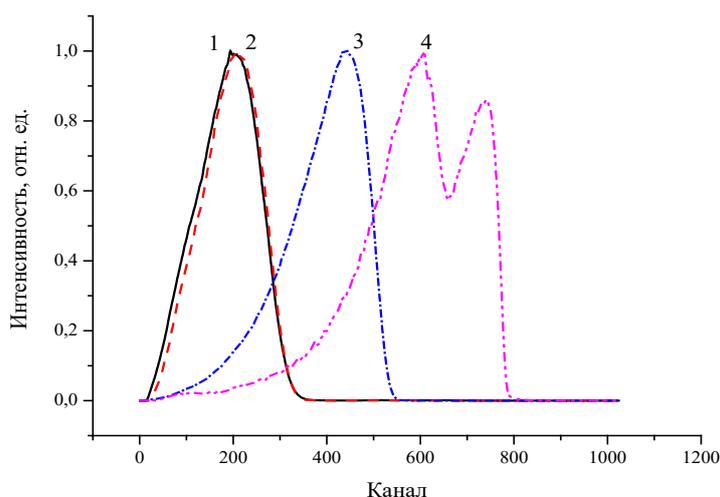


Рис. 1. β -Спектр облученной на циклотроне Cyclone 18/9 НС воды [^{18}O]H₂O, измеренный методом жидкостной сцинтилляционной спектроскопии: 1 – анализируемый образец (сплошная линия); 2 – эталон ^3H (пунктирная линия); 3 – эталон ^{14}C ; 4 – эталон ^{90}Sr + ^{90}Y

Fig. 1. β -Spectrum of [^{18}O]H₂O water irradiated on the Cyclone 18/9 НС cyclotron, measured by liquid scintillation spectroscopy: 1 – analyzed sample (solid line); 2 – standard ^3H (dotted line); 3 – standard ^{14}C ; 4 – standard ^{90}Sr + ^{90}Y

Моделирование процесса методом Монте-Карло [11] дает значения активности трития на 40 % более высокие, чем полученные экспериментально. Этот эффект обусловлен осаждением радионуклида на стенках мишени и полимерных капиллярах линии трансфера облученной воды от циклотрона в модуль синтеза. При длительностях облучения, превышающих период полураспада ^{18}F ($t_{1/2} = 110$ мин), отношение $A_{\text{H}^3}/A_{\text{F}^{18}}$ несколько возрастает, что обусловлено распадом части наработанного ^{18}F . Так, по полученным нами экспериментальным данным, при длительности облучения свыше 110 мин отношение $A_{\text{H}^3}/A_{\text{F}^{18}}$ возрастает до значений $\sim 2,2 \cdot 10^{-6}$.

По оценке менеджмента корпорации Taiyo Nippon Sanso (Япония) – одного из ведущих мировых производителей $^{18}\text{O}_2$ методом криогенной дистилляции, около половины мирового потребления $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ составляет повторно (или многократно) используемая вода [12]. Однако при повторном использовании для производства РФП очищенной регенерированной воды $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ нет линейной зависимости активности ^3H от дозы облучения. Нами в ходе исследования наблюдался большой разброс активностей ^3H при близких значениях дозы облучения (см. таблицу). Это обусловлено тем, что в результате обогащения воды по изотопу кислорода ^{18}O как центрифужным, так и дистилляционным методами, одновременно с накоплением тяжелых изотопов кислорода (^{18}O и ^{17}O) будет увеличиваться и активность ^3H . При этом большинство мелких производителей зачастую после повторного обогащения не проводят очистку от трития посредством окисления воды до молекулярного кислорода $[^{18}\text{O}]\text{O}_2$ с последующим его восстановлением водородом природного изотопного состава. По нашим данным, в повторно используемой воде $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ содержание ^3H может достигать 400 Бк/мл и более. Для сравнения – содержание трития в коммерчески поставляемой H_2^{18}O воде варьируется в диапазоне от $2,2 \cdot 10^{-3}$ до 0,4 Бк/мл [8, 13, 14].

Содержание трития в регенерированной после облучения $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$
Tritium content in regenerated after irradiation $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$

Номер партии Batch Number	Наработка на мишени, мкА·мин Operating time on the target, mkA·min	Активность ^3H , Бк Activity ^3H , Bq	Отношение активность/наработка, Бк / мкА·мин Activity/operating time ratio, Bq / mkA·min
1	4700	88 016	18,73
2	9867	158 834	16,10
3	4884	100 993	20,68
4	533	9266	17,39

Тритий накапливается в облученной $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ в весьма существенных количествах (см. таблицу). Так, в условиях рутинного производства содержание трития в регенерированной воде, прошедшей через анионообменный картридж и собираемой для повторного использования, варьируется в пределах от 30 до 230 кБк/мл в зависимости от условий облучения – энергии протонного пучка, величины ионного тока, длительности облучения и т. д. [8, 13–17]. В условиях рутинного производства на циклотроне Cyclone 18/9 НС с энергией 18 МэВ при ионном токе 70–80 мкА и длительности облучения 80–140 мин удельная активность ^3H в регенерированной воде, собираемой с 200 синтезов, составляла 130–200 кБк/мл [12].

Активность ^3H такова, что, согласно требованиям Санитарных норм и правил «Требования к обеспечению радиационной безопасности персонала и населения при обращении с радиоактивными отходами» (утверждены постановлением Министерства здравоохранения Республики Беларусь 30.12.2016 № 142) и Гигиеническому нормативу «Критерии оценки радиационного воздействия», содержащая тритий регенерированная вода должна рассматриваться как РАО низкого уровня активности. Причем удельная активность регенерата с рутинного производства на два-три порядка выше уровня освобождения из-под контроля согласно указанным нормативным документам. С учетом периода полураспада ^3H ($t_{1/2} = 12,5$ лет) возникает проблема хранения (или утилизации) регенерированной воды.

Тритий детектировался в воде, прошедшей через анионообменный картридж (так называемой регенерат), в отходах органических растворителей от промывки модулей (растворе ацетонитри-

ла), а так же в воде, которой промывалась мишень. Основная доля ^3H (около 95 %) остается в регенерате. Остатки (5 %) смываются с ионообменной смолы ацетонитрилом, две трети которых (3,2 %) попадает в отходы [8]. По информации [8], в отходах производства 2-фтордезоксиглюкозы (ФДГ) содержится 1,46 Бк/мл трития, что согласуется с нашими данными. 1,6 % от наработанной активности трития уносится из зоны синтеза с газами и парами воды, образующимися при синтезе, что, как правило, не превышает $4 \cdot 10^{-8}$ от наработанной на циклотроне активности ^{18}F . Обычно в одном производственном цикле наработка ^{18}F составляет от 150 до 300 ГБк. Следует ожидать, что за один синтез с газообразными веществами улетучивается 6–15 кБк трития. В рутинном производстве в течение года проводится ~ 250 – 500 синтезов при работе в односменном режиме и, соответственно, ~ 3 – 6 МБк ^3H выбрасывается с газообразными отходами. На отдельных производственных площадках в России производится свыше 1800 синтезов ^{18}F в год. При синтезе холина объем газообразных выбросов может увеличиваться в 2 раза, но не будет выше 3–4 % от активности трития, что эквивалентно $\sim 1 \cdot 10^{-7}$ от активности ^{18}F , наработанной на циклотроне.

Оценка выбросов ^3H в окружающую среду при производстве ФДГ и определение дозы, получаемой населением, были выполнены в [17]. Газообразные выбросы из горячих лабораторий перед попаданием в атмосферу проходили через фильтры из древесного угля. Содержание ^3H определялось методом электролитического обогащения с последующими измерениями на жидкосцинтилляционном спектрометре NIDEX 300 SL. Было обнаружено увеличение средней активности трития в воздухе после ввода циклотрона (наработки активности в течение 3 лет) в 3–4 раза – с $\sim 0,30$ по 0,80–1,02 Бк/л. Дополнительно накопленная населением вследствие этого доза была оценена как 0,08 мЗв/год.

Согласно данным наших исследований и [8, 13, 15, 18], в готовой форме большинства РФП (ФДГ, холин, метионин) концентрация трития близка к пределу разрешения методики измерения. Так, содержание ^3H в ФДГ обычно не превышает 1 Бк/мл, что почти на пять порядков величины ниже содержания трития в облученной воде. Исключение составляет Na^{18}F . Содержание ^3H в РФП ^{18}F - NaF было примерно на три порядка выше, чем в ФДГ, и составляло 560 Бк/мл, что связано с особенностями технологии его получения.

Тритий накапливается в стенках мишени циклотрона и линии трансфера вследствие диффузии из облученной воды. Материал тела мишени Nb легко поглощает водород с образованием твердого раствора водорода и гидрида NbH, представляющего собой серый кристаллический порошок. Серый налет на поверхности ниобиевых мишеней визуально наблюдался нами и авторами [19] после длительного облучения (более 2000 мкА · ч). Как известно, входное окно водной мишени циклотрона делается из сплава Navar, основными компонентами которого являются Fe, Ni и Co [12, 18]. Накопление ^3H может приводить к преждевременной деформации или даже разрыву входного окна мишени. Поэтому целесообразно периодически проводить промывку мишени для удаления остатков облученной воды, обогащенной тритием. После промывки мишени содержание трития в промывочной воде сильно различается и может варьироваться от 1,4 Бк/мл [20] до 92 Бк/мл [15]. Причина такого расхождения не совсем ясна, но, возможно, сказываются различный дизайн мишени, ее объем (1,3 и 2,4 мл), материал мишени (Nb и Ti), режим продувки мишени, объем промывочной воды и количество производственных циклов перед промывкой мишени.

На рис. 2, 3 приведены β -спектры шести образцов регенерированной воды $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ после облучения трех различных мишеней с накопленной дозой свыше 2 мкА · ч. Они кардинально отличаются от аналогичного спектра после облучения «чистой» (необлученной) мишени (сравн. рис. 1 и 2). Кроме максимума, обусловленного тритием, на спектрах наблюдается максимум в низкоэнергетической части спектра и широкая слабоинтенсивная полоса в области 400–800 каналов. Данная область соответствует энергиям 150–650 кэВ. Пики в этом диапазоне энергий соответствуют таким радионуклидам, как ^{56}Co с $E = 179$ и 632 кэВ и ^{58}Co с $E = 475$ кэВ. Интенсивности низкоэнергетического максимума и высокоэнергетической полосы при длительном хранении (более месяца) регенерированной $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ снижается, а интенсивность тритиевой полосы практически не изменяется (см. рис. 2, кривые 1, 2)

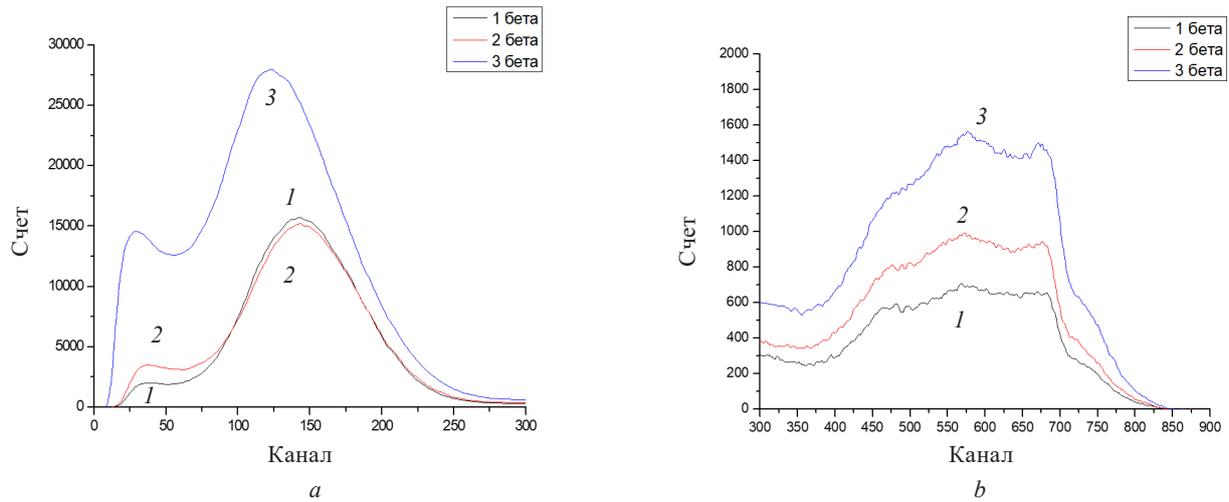


Рис. 2. β -Спектры регенерированной $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ после облучения на циклотроне Cyclone 18/9 HC мишени № 5, измеренные через 2 мес (кривая 1) и неделю (кривые 2, 3) после синтеза. Длительность облучения: кривые 1, 2 – 70 мин; кривая 3 – 120 мин

Fig. 2. β -Spectra of regenerated $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ after irradiation on the Cyclone 18/9 HC cyclotron of target no. 5, measured 2 months (curve 1) and a week (curves 2, 3) after synthesis. Duration of irradiation: curves 1, 2 – 70 min; curve 3 – 120 min

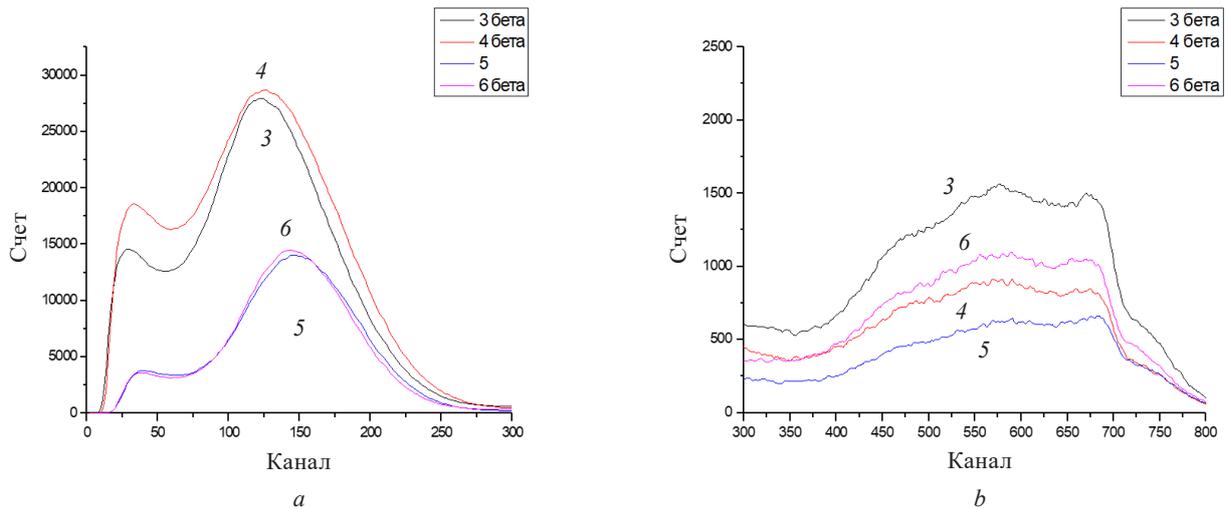


Рис. 3. β -Спектры регенерированной $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ после облучения на циклотроне Cyclone 18/9 HC мишеней № 5 (кривая 3), № 2 (кривые 4, 6) и № 1 (кривая 5), измеренные через неделю после синтеза.

Длительность облучения: кривые 5, 6 – 80 мин; кривые 3, 4 – 120 мин

Fig. 3. β -Spectra of regenerated $[^{18}\text{O}]\text{H}_2\text{O}$ after irradiation on the Cyclone 18/9 HC cyclotron of targets no. 5 (curve 3), no. 2 (curves 4, 6) and no. 1 (curve 5), measured a week after synthesis. Duration of irradiation: curves 5, 6 – 80 min; curves 3, 4 – 120 min

Кривые 2 и 3 на рис. 2 отличаются только длительностью (и, соответственно, дозой) облучения мишени. Их сравнение подтверждает линейную зависимость содержания ^3H от дозы облучения.

Положение максимума низкоэнергетической полосы изменяется в широких пределах – от 29-го (кривая 3) до 40-го канала (кривая 5). Его интенсивность растет с длительностью облучения быстрее интенсивности тритиевой полосы. Так, если при длительности облучения 70 мин (кривая 2 на рис. 2) его интенсивность составляла $\sim 12\%$ от интенсивности тритиевой полосы, то при увеличении длительности облучения до 120 мин (кривая 3 на рис. 2) она увеличивалась до $> 50\%$ от тритиевой полосы. Кроме того, наблюдалась существенная зависимость интенсивности этой полосы от мишени, на которой проводилось облучение (см. рис. 3).

Интенсивность широкой высокоэнергетической полосы жесткой корреляции с дозой облучения не проявляла. Это видно из сравнения образцов 2, 3 (см. рис. 2, *b*) и 4, 6 (см. рис. 3), облучавшихся разными дозами на мишенях № 5 и 2, соответственно. Так, если на мишени № 5 с увеличением длительности облучения (ростом дозы) интенсивность этой полосы существенно возрастает (см. рис. 2), то на мишени № 2 с ростом дозы наблюдался обратный эффект – на кривой 4 интенсивность высокоэнергетической полосы была ниже, чем на кривой 6. На этой полосе можно выделить по крайней мере три локальных максимума – в области ~ 470, 570 и 680 каналов (см. рис. 2, *b* и 3, *b*).

Отметим, что даже после облучения «грязных» мишеней (накопленная доза до 7000 мкА · ч) в готовых радиофармпрепаратах [¹⁸F] метилхолине и [¹⁸F]ФДГ содержание трития и других β-излучающих радионуклидов было ниже предела обнаружения использовавшейся методики, что согласуется с данными [8, 14, 19]. Это обусловлено высокой степенью очистки указанных препаратов от нежелательных радионуклидов в процессе синтеза.

Приведенные экспериментальные результаты указывают на присутствие в регенерированной [¹⁸O]H₂O нескольких β-излучающих нуклидов с разной энергией испускаемых электронов и периодом полураспада. При облучении «грязной» мишени их суммарная активность в низкоэнергетической области β-спектров в первые несколько дней после синтеза может быть сравнима и даже превышать активность ³H [23]. Сильное низкоэнергетическое излучение увеличивает погрешность измерения концентрации трития.

Для анализа полученных экспериментальных данных авторы использовали ранее опубликованные материалы [10] по исследованию γ-излучающих радионуклидов при облучении мишеней с большой накопленной дозой. Было идентифицировано более 20 нежелательных γ-излучающих РН, образующих в процессе производства РФП на основе ¹⁸F. Большинство из них являются β-излучателями [10]. Они в основном распадаются посредством К-захвата или испускают позитроны (β⁺-распад), реже – электроны (β⁻-распад).

В γ-спектрах регенерированной воды доминирующими являются изотопы кобальта ⁵⁶Co и ⁵⁷Co с активностью на момент измерения ~ (2–6) · 10⁴ Бк/мл каждый. ⁵⁶Co имеет линии β-излучения с энергиями 179 и 631 кэВ и может определять вид высокоэнергетической области β-спектров. Он имеет период полураспада 77,3 сут. Кроме того, нами наблюдались РН ⁵⁸Co и ⁶⁵Zn с активностями ~ (1–3) · 10² Бк/мл. Они имеют линии β-излучения с энергиями 475 (⁵⁸Co) и 325 кэВ (⁶⁵Zn).

Сигнал в низкоэнергетической области спектра β-излучения, вероятнее всего, обусловлен Оже-электронами, а также выбиванием низкоэнергетических электронов γ-квантами и рентгеновским излучением при прохождении через воду [12]. Оже-электроны и рентгеновское излучение образуются при распаде радионуклидов в процессе К-захвата. В γ-спектрах наблюдались радиоизотопы Co, Cr, Tc, Nb, Zn и Mn с удельной активностью в диапазоне 50–1000 Бк/мл на момент окончания синтеза, которые распадаются путем К-захвата, сопровождающегося рентгеновским излучением [10, 21]. В частности, таким путем распадается ⁵⁷Co, являющийся, как уже отмечено, доминирующим в γ-спектрах регенерированной воды. Вероятнее всего, указанные радионуклиды ответственны за низкоэнергетическую часть β-спектров регенерированной воды.

Следует также учитывать наличие после облучения изотопа ⁵⁵Fe, который образуется при облучении Navar-фольги протонами по реакции ⁵⁵Mn(*p*, *n*)⁵⁵Fe с пороговой энергией 1,032 МэВ и при распаде короткоживущего ⁵⁵Co [10]. Указанный РН излучает в рентгеновском диапазоне (энергия 5,9 кэВ) и по этой причине не детектировался при измерении γ-спектров. ⁵⁵Fe наблюдался авторами [22] при облучении водной мишени с входным окном из Navar-фольги на 9,6 МэВ циклотроне CYPRIS MINI trace. Его удельная активность в регенерированной воде была максимальной из всех обнаруженных РН и составляла 1243 Бк/мл на 3-й день после синтеза [20]. Радиоизотоп ⁵⁵Fe распадается путем К-захвата и является долгоживущим радионуклидом с периодом полураспада 2,7 года. По всей вероятности, он ответственен за оставшийся после 3-месячной выдержки низкоэнергетический пик.

Авторы [20] в облученной воде [¹⁸O]H₂O обнаружили еще один низкоэнергетический радионуклид – ⁵⁹Ni с энергией 6,9 кэВ и периодом полураспада $t_{1/2} = 7,5 \cdot 10^4$ лет. Этот РН должен образовываться в Navar-фольге по реакции ⁵⁹Co(*p*, *n*)⁵⁹Ni. Его удельная активность в регенерированной

воде была в 3 раза ниже удельной активности ^{55}Fe . Он также должен вносить вклад в низкоэнергетический пик.

С учетом полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы по обеспечению радиационной безопасности и надлежащему обращению с радиоактивными отходами, возникающими при производстве радиофармпрепаратов на основе ^{18}F с использованием циклотрона ИВА Cyclone 18/9 НС. Для пациентов нежелательные β -излучающие радионуклиды не представляют опасности, поскольку они эффективно удаляются в процессе синтеза РФП и в готовой лекарственной форме их содержание не превышает предела обнаружения использованной методики (10 Бк/кг). Для населения β -излучатели также не представляют опасности, поскольку только 1,6 % от наработанной активности трития уносится из зоны синтеза с газами и парами воды, образующимися при синтезе. Дополнительно (вследствие выброса трития) накопленная населением, постоянно проживающим на расстоянии ~ 100 м от ПЭТ-центра, доза может быть оценена как 0,1 мЗв/год, что на порядок ниже дозы, полученной от естественного фона (~ 1 мЗв в Минске).

Норматив по тритию достаточно высок (10^6 Бк/г), поэтому жидкие радиоактивные отходы (регенерированная вода) обычно относятся к низкоактивным РАО и не представляют серьезной опасности. Однако в связи с большим периодом полураспада трития (12,5 года) необходимо обеспечивать места для длительного хранения регенерированной воды либо переработку регенерата с целью повторного использования. Другие β -излучатели накапливаются в облученной воде только при длительном использовании мишени и накопленной дозе свыше 2000 мкА/ч. В связи с этим желательно менять мишенные вставки после указанной накопленной дозы.

Заключение. С целью уточнения обращения с радиоактивными отходами исследован процесс накопления нежелательных β -излучающих радионуклидов при производстве различных РФП на основе ^{18}F и проанализировано обеспечение радиационной безопасности при использовании циклотрона ИВА Cyclone 18/9 НС.

Показано, что тритий является основным примесным радионуклидом, образующимся по реакции $^{18}\text{O}(p, t)^{16}\text{O}$ при облучении воды $[\text{O}^{18}]\text{H}_2\text{O}$ протонами. Другие β -излучатели накапливаются в облученной воде в результате выщелачивания активированных материалов стенки мишени при накопленной дозе свыше 2 мкА · ч.

Указанные обстоятельства обуславливают необходимость контроля содержания β -излучающих РН в промежуточных продуктах, отходах производства и конечном радиофармпрепарате. Кроме того, требуется мониторинг рабочих помещений ПЭТ центра с целью оценки доз, получаемых как персоналом, так и пациентами, а также улучшения методов рециркуляции. С учетом полученных экспериментальных результатов были сделаны выводы по обеспечению радиационной безопасности согласно нормативным документам Республики Беларусь и надлежащему обращению с радиоактивными отходами.

Список использованных источников

1. PET-CT and PET-MRT in Oncology: A Practical Guide (Medical Radiology) / eds.: P. Peller, R. Subramaniam, A. Guermazi. – Springer, 2012. – 470 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01139-9>
2. Рыжов, С. А. К вопросу о безопасности персонала в отделении ядерной медицины / С. А. Рыжов, А. В. Водватов, Ю. В. Дружинина // Актуальные проблемы разработки, производства и применения радиофармацевтических препаратов: сб. тез. докл. IV Междунар. науч.-практ. конф. «РАДИОФАРМА-2021», Москва, 30 сент. – 3 окт. 2021 г. / ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А. И. Бурназяна ФМБА России; под ред. Г. Е. Кодиной, А. А. Лабушкиной. – М., 2021. – С. 54.
3. Production and Quality Control of Fluorine-18 Labelled Radiopharmaceuticals. IAEA-TECDOC-1968 [Electronic resource]. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2021. – 155 p. – Mode of access: <https://www.iaea.org/publications/14925/production-and-quality-control-of-fluorine-18-labelled-radiopharmaceuticals>
4. Radiological Protection in PET and PET/CT [Electronic resource] / eds. C. H. Clement, T. Yasumune. – SAGE, 2022. – Mode of access: <https://www.icrp.org/docs/TG117%20Draft%20Report%20for%20Public%20Consultation.pdf>
5. Kim, S. T. Radiation dose assessment for radiation workers during ^{18}F -FDG synthesis and dispensing activities in hot cells: a proposal to improve the safety of radiation protection measures for workers / S. T. Kim, J. Kim, J. M. Park // Int. J. Radiat. Res. – 2019. – Vol. 17, № 4. – P. 587–593. <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijrr.17.3.587>
6. Długosz-Lisiecka, M. High-Level Radioactive Wastes from ^{18}F and ^{11}C Isotopes Production / M. Długosz-Lisiecka, T. Jakubowska, A. Zawada // J. Hazard. Toxic Radioact. Waste. – 2020. – Vol. 25, № 2. – Art. ID 04020072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000580)

7. Qualitative Analysis of Long-Lived Residual Radioisotopes in 18 MeV Proton Bombarded Enriched Water / I. Kambali [et al.] // *J. Phys. Conf. Series.* – 2020. – Vol. 1436. – Art. ID 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012021>
8. Tritium in [¹⁸O]water containing [¹⁸F]fluoride for [¹⁸F]FDG synthesis / Shigeki Ito [et al.] // *Appl. Radiat. Isot.* – 2004. – Vol. 61, № 6. – P. 1179–1183. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.04.002>
9. Бринкевич, Д. И. Активация воды контура охлаждения циклотрона Cyclone 18/9 НС при наработке ¹⁸F / Д. И. Бринкевич, А. Я. Малиборский, С. Д. Бринкевич // *Ядер. физика и инжиниринг.* – 2018. – Т. 9, № 4 – С. 404–410. <https://doi.org/10.1134/S2079562918040024>
10. Бринкевич, С. Д. Активационные радионуклиды при облучении ниобиевой мишени на циклотроне Cyclone 18/9 НС / С. Д. Бринкевич, Д. И. Бринкевич, А. Н. Кийко // *Ядер. физика и инжиниринг.* – 2019. – Т. 10, № 6. – С. 574–580. <https://doi.org/10.1134/S2079562919050051>
11. Monte Carlo simulation and radiometric characterization of proton irradiated [¹⁸O]H₂O for the treatment of the waste streams originated from [¹⁸F]FDG synthesis process / R. Remetti [et al.] // *Appl. Radiat. Isot.* – 2011. – Vol. 69, № 7. – P. 1046–1051. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.02.008>
12. Reprocessing of Irradiated [¹⁸O]H₂O under the Conditions of a PET Center / S. D. Brinkevich [et al.] // *Radiochemistry.* – 2019. – Vol. 61, № 4. – P. 483–490. <http://doi.org/10.1134/S1066362219040131>
13. Quantification of the activity of tritium produced during the routine synthesis of ¹⁸F fluorodeoxyglucose for positron emission tomography / C. Marshall [et al.] // *J. Radiol. Prot.* – 2014. – Vol. 34, № 2. – P. 435–444. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/2/435>
14. Radionuclide impurities in proton-irradiated [¹⁸O]H₂O for the production of ¹⁸F⁻: Activities and distribution in the [¹⁸F]FDG synthesis process / L. Bowden [et al.] // *Appl. Radiat. Isot.* – 2009. – Vol. 67, № 2. – P. 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.10.015>
15. Measurement of the induced radionuclides in production of radiopharmaceuticals for positron emission tomography (PET) / Shingo Mochizuki [et al.] // *J. Nucl. Sci. Technol.* – 2006. – Vol. 43, № 4. – P. 348–353. <http://doi.org/10.3327/jnst.43.348>
16. Radionuclide impurities in [¹⁸F]F- and [¹⁸F]FDG for positron emission tomography / M. Köhler [et al.] // *Appl. Radiat. Isot.* – 2013. – Vol. 81. – P. 268–271. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.03.044>
17. Peixoto, C. M. Assessment of atmospheric tritium concentration levels due to the normal operation of a radiopharmaceutical production unit (UPPR) [Electronic resource] / C. M. Peixoto, V. M. F. Jacomino, V. S. Dias // 2011 Intern. Nuclear Atlantic Conf. – INAC 2011; Belo Horizonte, MG, Brazil, 24–28 Oct. 2011. – Mode of access: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/048/43048824.pdf.
18. Долгоживущие радионуклиды при производстве [¹⁸F]фторхолина для ПЭТ-диагностики / П. В. Тылец [и др.] // *Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук.* – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 359–368. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-359-368>
19. Niobium sputtered Havar foil for the high-power production of reactive [¹⁸F]fluoride by proton irradiation of [¹⁸O]H₂O targets / J. S. Wilson [et al.] // *Appl. Radiat. Isot.* – 2008. – Vol. 66, № 5. – P. 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.12.004>
20. Distribution and separation of metallic and radionuclides impurities in the production of ¹⁸F-fluorodeoxyglucose / K. Kilian [et al.] // *J. Radioanal. Nucl. Chem.* – 2016. – Vol. 307, № 2. – P. 1037–1043. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4328-6>
21. Долгоживущие радионуклиды в производстве 2-[¹⁸F]фтордезоксиглюкозы / Д. И. Бринкевич [и др.] // *Мед. физика.* – 2018. – № 1 (77). – С. 80–88.
22. Radioactive byproducts in [¹⁸O]H₂O used to produce ¹⁸F for [¹⁸F]FDG synthesis / Shigeki Ito [et al.] // *Appl. Radiat. Isot.* – 2006. – Vol. 64, № 3. – P. 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.10.001>
23. Долгоживущие β-излучающие радионуклиды при производстве радиофармпрепаратов на основе ¹⁸F / Д. И. Бринкевич [и др.] // *Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. С, Фундамент. науки.* – 2019. – № 4. – С. 67–76.

References

1. Peller P., Subramaniam R., Guermazi A., eds. *PET-CT and PET-MRT in Oncology: A Practical Guide (Medical Radiology)*. Springer, 2012. 470 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-01139-9>
2. Ryzhov S. A., Vodvatov A. V., Druzhinina Yu. V. On the issue of personnel safety in the Department of Nuclear Medicine. Kodina G. E., Labushkina A. A., eds. *Aktual'nye problemy razrabotki, proizvodstva i primeneniya radiofarmatsevticheskikh preparatov: sbornik tezisov dokladov IV Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "RADIOFARMA-2021"*, Moskva, 30 sentyabrya – 3 oktyabrya 2021 g. [Actual problems of development, production and application of radiopharmaceuticals: Collection of abstracts of the IV International Scientific and Practical Conference "RADIOFARMA-2021", Moscow, September 30 – October 3, 2021]. Moscow, 2021, p. 54 (in Russian).
3. *Production and Quality Control of Fluorine-18 Labelled Radiopharmaceuticals. IAEA-TECDOC-1968*. Vienna, International Atomic Energy Agency, 2021. 155 p. Available at: <https://www.iaea.org/publications/14925/production-and-quality-control-of-fluorine-18-labelled-radiopharmaceuticals>
4. Clement C. H., Yasumune T. *Radiological Protection in PET and PET/CT*. 2022. Available at: <https://www.icrp.org/docs/TG117%20Draft%20Report%20for%20Public%20Consultation.pdf>.
5. Kim S. T., Kim J., Park J. M. Radiation dose assessment for radiation workers during ¹⁸F-FDG synthesis and dispensing activities in hot cells: a proposal to improve the safety of radiation protection measures for workers. *International Journal of Radiation Research*, 2019, vol. 17, no. 4, pp. 587–593. <https://doi.org/10.18869/acadpub.ijrr.17.3.587>
6. Długosz-Lisiecka M., Jakubowska T., Zawada A. High-Level Radioactive Wastes from ¹⁸F and ¹¹C Isotopes Production. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 2020, vol. 25, no 2, art. ID 04020072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000580](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000580)

7. Kambali I., Suryanto H., Rajiman, Parwanto, Rindiyantono F., Billah A. A., Pasha. Qualitative Analysis of Long-Lived Residual Radioisotopes in 18 MeV Proton BombarDED Enriched Water. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, vol. 1436, art. ID 012021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012021>
8. Shigeki Ito, Takuya Saze, Hitoshi Sakane, Satoshi Ito, Shinichi Ito, Kunihide Nishizawa. Tritium in [¹⁸O]water containing [¹⁸F]fluoride for [¹⁸F]FDG synthesis. *Applied Radiation and Isotopes*, 2004, vol. 61, pp. 1179–1183. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2004.04.002>
9. Brinkevich D. I., Maliborskii A. Ya., Brinkevich S. D. Activation of the cooling circuit water of the Cyclone 18/9 HC cyclotron at operating time of 18F. *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, vol. 82, no. 4, pp. 1714–1720. <https://doi.org/10.1134/s1063778819120044>
10. Brinkevich S. D., Brinkevich D. I., Kiyko A. N. Activation radionuclides during irradiation of a niobium target on a Cyclone 18/9 HC cyclotron. *Physics of Atomic Nuclei*, 2019, vol. 83, pp. 1732–1737. <https://doi.org/10.1134/s1063778820090045>
11. Remetti R., Burgio N. T., Maciocco L., Arcese M., Azzurra Filannino M. Monte Carlo simulation and radiometric characterization of proton irradiated [¹⁸O]H₂O for the treatment of the waste streams originated from [¹⁸F]FDG synthesis process. *Applied Radiation and Isotopes*, 2011, vol. 69, no. 7, pp. 1046–1051. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.02.008>
12. Brinkevich S. D., Krot V. O., Brinkevich D. I., Tugai O. V., Edimecheva I. P., Ivanyukovich A. A. Reprocessing of Irradiated [¹⁸O]H₂O under the Conditions of a PET Center. *Radiochemistry*, 2019, vol. 61, no. 4, pp. 483–490. <http://doi.org/10.1134/S1066362219040131>
13. Marshall C., Talboys M. A., Bukhari S., Evans W. D. Quantification of the activity of tritium produced during the routine synthesis of ¹⁸F fluorodeoxyglucose for positron emission tomography. *Journal of Radiological Protection*, 2014, vol. 34, no. 2, pp. 435–444. <https://doi.org/10.1088/0952-4746/34/2/435>
14. Bowden L., Vintró L. L., Mitchell P. I., O'Donnell R. G., Seymour A. M., Duffy G. J. Radionuclide impurities in proton-irradiated [¹⁸O]H₂O for the production of ¹⁸F⁻: Activities and distribution in the [¹⁸F]FDG synthesis process. *Applied Radiation and Isotopes*, 2009, vol. 67, no. 2, pp. 248–255. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2008.10.015>
15. Mochizuki S., Ogata Y., Hatano K., Abe J., Ito K., Ito Y., Nishino M., Miyahara H., Ishigure N. Measurement of the induced radionuclides in production of radiopharmaceuticals for positron emission tomography (PET). *Journal of Nuclear Science and Technology*, 2006, vol. 43, no. 4, pp. 348–353. <http://doi.org/10.3327/jnst.43.348>
16. Köhler M., Degering D., Zessin J., Füchtner F., Konheiser J. Radionuclide impurities in [¹⁸F]F⁻ and [¹⁸F]FDG for positron emission tomography. *Applied Radiation and Isotopes*, 2013, vol. 81, pp. 268–271. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.03.044>
17. Peixoto C. M., Jacomino V. M. F., Dias V. S. Assessment of atmospheric tritium concentration levels due to the normal operation of a radiopharmaceutical production unit (UPPR). *2011 Intern. Nuclear Atlantic Conf. – INAC 2011; Belo Horizonte, MG, Brazil, 24–28 Oct. 2011*. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/43/048/43048824.pdf
18. Tylets P. V., Tugay O. V., Krot V. O., Ivanyukovich A. A., Soroka S. A., Brinkevich D. I., Brinkevich S. D., Baranovskii O. A., Chizh G. V. Long-lived radionuclides in the production of [¹⁸F]fluorocholine for PET-diagnosis. *Vestsi Natsyonal'най akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 359–368 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-3-359-368>
19. Wilson J. S., Avila-Rodriguez M. A., Johnson R. R., Zyuzin A., McQuarrie S. A. Niobium sputtered Havar foil for the high-power production of reactive [¹⁸F]fluoride by proton irradiation of [¹⁸O]H₂O targets. *Applied Radiation and Isotopes*, 2008, vol. 66, no. 5, pp. 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2007.12.004>
20. Kilian K., Pęgier M., Pękal A., Pyrzyńska K. Distribution and separation of metallic and radionuclides impurities in the production of ¹⁸F-fluorodeoxyglucose. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2016, vol. 307, no. 2, pp. 1037–1043. <https://doi.org/10.1007/s10967-015-4328-6>
21. Brinkevich D. I., Brinkevich S. D., Baranovsky O. A., Chizh G. V., Ivanyukovich A. A. Long-lived radionuclides in the production of 2-[¹⁸F]fluorodeoxyglucose. *Meditinskaya fizika = Medical Physics*, 2018, no. 1 (77), pp. 80–88 (in Russian).
22. Shigeki Ito, Hitoshi Sakane, Shizuhiko Deji, Takuya Saze, Kunihide Nishizawa. Radioactive byproducts in [¹⁸O]H₂O used to produce ¹⁸F for [¹⁸F]FDG synthesis. *Applied Radiation and Isotopes*, 2006, vol. 64, no. 3, pp. 298–305. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2005.10.001>
23. Brinkevich D. I., Brinkevich S. D., Vabishchevich S. A., Krot V. O., Maliborskii A. Ya. Long-lived β-emitting radionuclides in the production of 18F-based radiopharmaceuticals. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki = Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences*, 2019, no. 4, pp. 67–76 (in Russian).