

ВЕСЦІ НАЦЫЯНАЛЬнай АКАДЭМІІ НАВУК БЕЛАРУСІ

СЕРЫЯ ФІЗІКА-ТЭХНІЧНЫХ НАВУК. 2024. Т. 69, №3

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ

СЕРИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК. 2024. Т. 69, №3

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. Ильющенко** – Государственное научно-производственное объединение порошковой металлургии – Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа, Минск, Республика Беларусь
- Б. Каталинич** – Центрально-Европейское отделение Международной инженерной академии, Вена, Австрийская Республика
- М. Консари** – Университет штата Луизиана, Батон-Руж, Соединенные Штаты Америки
- С. М. Костромицкий** – Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. Г. Кравцов** – Президиум Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- Л. Г. Красневский** – Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь
- А. П. 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: ftvesti@mail.ru
vestift.belnauka.by*

ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК БЕЛАРУСИ.

Серия физико-технических наук. 2024. Т. 69, № 3

Выходит на русском, белорусском и английском языках

Редактор *И. А. Старостина*
Компьютерная верстка *Ю. А. Агейчик*

Подписано в печать 24.09.2024. Выход в свет 27.09.2024. Формат 60 × 84¹/₈. Бумага офсетная.
Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 66 экз. Заказ 194.
Цена номера: индивидуальная подписка – 14,01 руб., ведомственная подписка – 32,74 руб.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Республиканское унитарное предприятие «Издательский дом «Беларуская навука».

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

© 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. 3

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

PROCEEDING OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF BELARUS.
Physical-technical series, 2024, vol. 69, no. 3
Printed in Russian, Belarusian and English languages

Editor *I. A. Starostina*
Computer imposition *Yu. A. Aheichyk*

It is sent of the press 24.09.2024. Appearance 27.09.2024. Format $60 \times 84^{1/8}$. Offset paper. The press digital.
Printed pages 10,23. Publisher's signatures 11,3. Circulation 66 copies. Order 194.
Number price: individual subscription – 14,01 byn., departmental subscription – 32,74 byn.

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

© 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

Акула И. П., Залесский В. Г., Чекан Н. М., Овчинников Е. В. Фторсодержащие покрытия алмазо-подобного углерода. 183

ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН

Камлюк А. Н., Лихоманов А. О., Говор Э. Г. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности. 194

Ольшанский А. И., Голубев А. Н. Кинетика влагообмена в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов. 206

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

Бойправ О. В., Белоусова Е. С., Мокеров В. С. Характеристики отражения, передачи и поглощения электромагнитного излучения углесодержащих материалов, пропитанных водными растворами хлоридов . . . 215

Менжинский А. Б., Пантелеев С. В., Менжинский П. Б., Сицко А. Л. Структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока. Часть 1. 225

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

Маковская Н. А., Леонтьева Т. Г., Баклай А. А., Кузьмук Д. А. Влияние минерализованного раствора на защитные свойства глин при изоляции радиоактивных отходов 233

Коренькова О. Б., Зарубо А. М., Радкевич А. В., Торопова В. В., Дашук Е. М. Влияние борной кислоты на физико-химическое состояние железа (III) в водных растворах. 244

Михальчева Э. А., Трифионов А. Г. Вероятностный анализ аварийных сценариев больших течей первого контура реакторной установки типа ВВЭР. 253

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**CONTENTS****MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY****Akula I. P., Zalesski V. G., Chekan N. M., Ovchinnikov E. V.** Fluorine containing diamond-like carbon coatings 183**POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER****Kamluk A. N., Likhomanov A. O., Govor E. G.** Dependence of the volume stability on the expansion rate of low-expansion foam 194**Ol'shanskii A. I., Golubev A. N.** Kinetics of moisture exchange during convection drying of thin flat wet materials 206**RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING****Boiprav O. V., Belousova E. S., Mokerov V. S.** Electromagnetic radiation reflection, transmission and absorption characteristics of charcoal-containing materials impregnated with chlorides aqueous solutions 215**Menzhinsky A. B., Pantelev S. V., Menzhinsky P. B., Sitsko A. L.** Structure of software and hardware module for research of DC electrical machines. Part 1. 225**DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS****Makovskaya N. A., Leontieva T. G., Baklay A. A., Kuzmuk D. A.** Effect of mineralized solution on protective properties of clays in radioactive waste isolation. 233**Korenkova O. B., Zaruba A. M., Radkevich A. V., Toropova V. V., Dashouk E. M.** Influence of boric acid on the speciation of iron (III) in aqueous solutions 244**Mikhalycheva E. A., Trifonov A. G.** Probabilistic safety analysis of the large primary circuit leakages accident scenarios in the VVER-reactor. 253

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

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ, МЕТАЛЛУРГИЯ
MATERIALS SCIENCES AND ENGINEERING, METALLURGY

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-183-189>
УДК 621.795.3;667.6;666.29;678.026.3



Оригинальная статья

И. П. Акула^{1*}, В. Г. Залесский¹, Н. М. Чекан¹, Е. В. Овчинников²

¹Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академика Купревича, 10, 220084, Минск, Республика Беларусь
²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы,
ул. Ожешко 22, 230023, Гродно, Республика Беларусь

**ФТОРСОДЕРЖАЩИЕ ПОКРЫТИЯ
АЛМАЗОПОДОБНОГО УГЛЕРОДА**

Аннотация. Получены фторсодержащие покрытия алмазоподобного углерода (DLC, от англ. diamondlike carbon) методом CVD осаждения с использованием деструкции газообразных углеводородов высокоэнергетическим ионным источником с анодным слоем. Исследован химический состав, структура, поверхностная энергия, механо-трибологические характеристики синтезированного тонкопленочного материала. Показано, что содержание фтора в осажденных покрытиях достигает 31 ат.%. Установлено, что присутствие фтора в покрытии DLC способствует формированию нанодисперсных графитоподобных структур. Фторсодержащие покрытия с большим содержанием sp^2 -гибридизированных атомов углерода и фрагментов графита демонстрируют снижение твердости. Такие покрытия обладают очень низким коэффициентом трения на уровне 0,03–0,07 в силу малого значения поверхностной энергии, которая может быть снижена в 1,5 раза по сравнению с беспримесным DLC. Установлено, что различные содержания фтора в тонкопленочном материале алмазоподобного углерода по-разному сказываются на взаимодействии покрытия DLC с полярными/неполярными диэлектриками. Результаты исследований могут быть использованы для технологии получения твердосмазочных материалов в узлах трения машин и механизмов, а также представляют интерес для медицины, пищевой промышленности, производства пластмасс, химических волокон в качестве химически инертных и коррозионностойких покрытий.

Ключевые слова: алмазоподобный углерод, фтор, поверхностная энергия, твердость, трение, изнашивающая способность

Конфликт интересов: в составе авторского коллектива – член редакционной коллегии доктор физико-математических наук В. Г. Залесский.

Информация об авторах: Акула Игорь Петрович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0003-6929-8335>. E-mail: shark@phti.by; Залесский Виталий Геннадьевич – доктор физико-математических наук, директор Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси. E-mail: v.zalesski@phti.by; Чекан Николай Михайлович – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией наноматериалов и ионно-плазменных процессов Физико-технического института Национальной академии наук Беларуси. E-mail: chekan@phti.by; Овчинников Евгений Витальевич – доктор технических наук, профессор кафедры машиноведения и технической эксплуатации автомобилей Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. E-mail: ovchin@grsu.by

Вклад авторов: Акула Игорь Петрович – формирование покрытий DLC : F, исследование механо-трибологических характеристик покрытий, написание и оформление текста статьи; Залесский Виталий Геннадьевич – постановка задач исследований, интерпретация результатов исследований, редактирование текста статьи; Чекан Николай Михайлович – исследование химического состава и структуры покрытий, интерпретация результатов исследований; Овчинников Евгений Витальевич – определение поверхностной энергии покрытия.

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Для цитирования: Фторсодержащие покрытия алмазоподобного углерода / И. П. Акула [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 183–193. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-183-193>

Поступила в редакцию: 18.04.2024

Доработанный вариант: 19.08.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article

Igor P. Akula^{1*}, Vitali G. Zalesski¹, Nikolai M. Chekan¹, Evgeniy V. Ovchinnikov²

¹Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
10, Kuprevich Str., 220141, Minsk, Republic of Belarus

²Yanka Kupala State University of Grodno,
22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of Belarus

FLUORINE CONTAINING DIAMOND-LIKE CARBON COATINGS

Abstract. Fluorine containing diamond-like carbon (DLC) coatings were obtained by CVD deposition using the destruction of gaseous hydrocarbons by a high-energy ion source with an anode layer. The chemical composition, structure, surface energy, mechano-tribological characteristics of the synthesized thin-film material were studied. It has been shown that the fluorine content in the deposited coatings reaches 31 at.%. It has been established that the presence of fluorine in the DLC coating promotes the formation of nanodispersed graphite-like structures. Fluorine containing coatings with a high content of sp^2 hybridized carbon atoms and graphite fragments show a decrease in hardness. Such coatings have a very low coefficient of friction at the level of 0.03–0.07 due to the low surface energy, which can be reduced by 1.5 times compared to pure DLC. It has been established that different fluorine contents in thin-film diamond-like carbon material have different effects on the interaction of the DLC coating with polar/non-polar dielectrics. The research results can be used for the technology of producing solid lubricants in friction units of machines and mechanisms, and are also of interest for medicine, the food industry, the production of plastics, and chemical fibers as chemically inert and corrosion-resistant coatings.

Keywords: diamond-like carbon, fluorine, surface energy, hardness, friction, wear ability

Conflict of interest: the author's team includes a member of the Editorial Board Dr. Sci. (Physics and Mathematics) Vitali G. Zalesski.

Information about the authors: Igor P. Akula – Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher at Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0009-0003-6929-8335>. E-mail: shark@phti.by; Vitali G. Zalesski – Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Director at Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: v.zalesski@phti.by; Nikolai M. Chekan – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory of Nanomaterials and Ion-Plasma Processes at Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: chekan@phti.by; Evgeniy V. Ovchinnikov – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Department of Mechanical Science and Technical Operation of Automobiles at Yanka Kupala State University of Grodno. E-mail: ovchin@grsu.by

Contribution of the authors: Igor P. Akula – deposition of DLC : F coatings, study of the mechano-tribological characteristics of coatings, writing and design of the article; Vitali G. Zalesski – setting research objectives, interpreting research results, editing the text of the article; Nikolai M. Chekan – study of the chemical composition and structure of coatings, interpretation of research results; Evgeniy V. Ovchinnikov – determination of the surface energy of the coating.

For citation: Akula I. P., Zalesski V. G., Chekan N. M., Ovchinnikov E. V. Fluorine containing diamond-like carbon coatings. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 183–193 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-183-193>

Received: 18.04.2024

Modified: 19.08.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. Углерод является достаточно активным химическим элементом, который может находиться в различных аллотропных состояниях. Например, в покрытиях алмазоподобного углерода содержатся структуры, характерные как для алмаза, так и графита по типу гибридизации химических связей. В то же время сами покрытия DLC (DLC, от англ. diamond-like carbon) представляют собой аморфный материал [1]. Легируя такого рода покрытия определенными добавками, можно управлять механическими свойствами, задавать требуемую электропроводимость, изменять поверхностную энергию, теплофизические, оптические и другие свойства [2, 3].

Сами легирующие добавки могут не только образовывать химическую связь с углеродом, но и внедряться в структуру материала по типу замещения, способствуя изменению соотношения sp^3 - и sp^2 -гибридизованных атомов углерода как в сторону увеличения, так и в сторону умень-

шения. В последние годы в литературе упоминается достаточно широкий спектр химических элементов, используемых для модификации тонкопленочных покрытий DLC [2, 3]. Наибольшее распространение получили следующие направления легирования DLC покрытий:

- добавки различных металлов, таких как Cu, Ti, Ni, Cr, Mo, W и др.;
- неметаллические добавки: N, Si, F.

Установлено, что покрытия DLC, модифицированные фтором (DLC : F), являются перспективным тонкопленочным материалом [4–8]. Соединения углерода с фтором образуют чрезвычайно прочную химическую связь, при этом поверхностная энергия принимает низкие значения [9], что находит широкое применение, например, в медицинской технике при создании имплантатов с высокой биосовместимостью, а также в трибологических приложениях. Свободная поверхностная энергия такого материала является определяющим фактором, который влияет на свойства поверхности и межфазных взаимодействий, таких как адсорбция, смачивание, адгезия и т. д.

Цель исследования – определить преимущества покрытий DLC : F, полученных методом химического осаждения из газовой фазы (CVD-методом, от англ. Chemical vapor deposition) активацией молекул и радикалов реакционных углеводородных газов с использованием ионного источника с анодным слоем.

Формирование тонкопленочного материала DLC : F и методы его исследования. На рис. 1 приведена схема получения покрытия DLC : F с применением высокоэнергетического ионного источника с анодным слоем. В экспериментах использовалась вакуумная установка УВНИПА-1-001 (Россия), оборудованная источником ионов «Радикал» ИИ-4-0,15. Подложка (1), в качестве которой использовалась пластина кремния, устанавливалась с держателем (2) на центральной позиции планетарной карусели в вакуумной камере (3). Предварительно поверхность подложки для очистки от органических загрязнений обрабатывалась в течение 30 мин с помощью ионного источника (4) ионами аргона, напускаемого из баллона (8). Параметры работы ионного источника в режиме очистки были следующие: давление аргона – $1,8 \cdot 10^{-2}$ Па, ускоряющее напряжение – 3500 В, сила тока – 80 мА. Для повышения эффективности очистки на подложку подавалось отрицательное напряжение смещения 1000 В через блок (9). Остаточное давление в вакуумной камере перед формированием покрытия составляло $1,5 \cdot 10^{-3}$ Па. Для получения покрытия DLC : F использовались ацетилен (C_2H_2) и тетрафторметан (CF_4), которые напускались в вакуумную камеру их баллонов (10 и 9 соответственно). Скорость подачи реакционных газов регулировалась системой натекания газов (7). Варьируемым параметром выступало отношение парциальных давлений C_2H_2 и CF_4 . Контроль давления в вакуумной камере выполнялся вакуумметром (6), оснащенный датчиком давления ионизационного типа (5). В качестве основы для нанесения покрытий DLC : F использовались пластины полированного монокристаллического кремния. Условия осаждения покрытий DLC : F приведены в табл. 1.

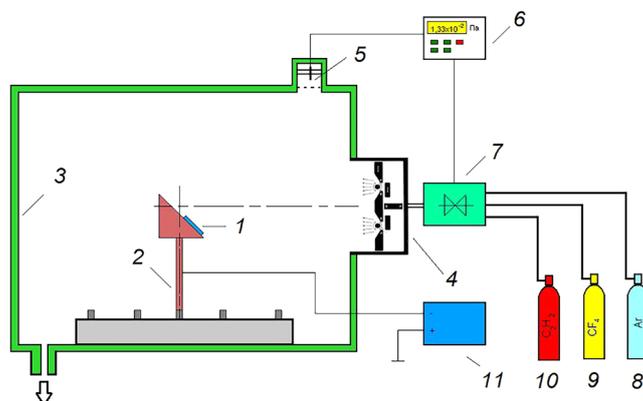


Рис. 1. Схема эксперимента по осаждению покрытий DLC : F: 1 – подложка; 2 – держатель подложки; 3 – вакуумная камера; 4 – ионный источник; 5 – датчик давления; 6 – вакуумметр; 7 – система натекания газов; 8 – баллон с Ar; 9 – баллон с CF_4 ; 10 – баллон с C_2H_2 ; 11 – блок напряжения смещения

Fig. 1. Scheme of the experiment on the deposition of DLC : F coatings: 1 – substrate; 2 – substrate holder; 3 – vacuum chamber; 4 – ion source; 5 – pressure sensor; 6 – vacuum meter; 7 – gas leakage system; 8 – Ar gas cylinder; 9 – CF_4 gas cylinder; 10 – C_2H_2 gas cylinder; 11 – offset voltage unit

Таблица 1. Условия осаждения покрытий DLC : F
Table 1. Conditions for the deposition of DLC : F coatings

№ образца	Давление (P, мПа)			Напряжение разряда (U, В)	Ток разряда (I, А)	Время осаждения (T, мин)
	C ₂ H ₂	CF ₄	общее			
1	2,7	–	2,7	1000	0,1	180
2	2,4	0,6	2,9–3,1			240
3	2,1	1,0	3,0–3,2			240
4	–	1,8	1,8			240

Толщина покрытия DLC : F измерялась на микроинтерферометре МИИ-4 (Россия). Информация о химическом составе сформированных покрытий была получена с использованием сканирующего электронного микроскопа Tescan MIRA 3 LMU (Чехия), оснащенного системой рентгеновского энергодисперсионного микроанализа Oxford Instruments INCA Energy 350 X-max 80 с безазотным детектором X-max 80 Standart. Структура тонкопленочного материала исследовалась методом комбинационного рассеяния света (КРС) на спектрометре SOL Instruments Confotec NR500 (Беларусь). В качестве источника возбуждающего излучения использовался лазер с длиной волны 473 нм. Твердость покрытий определялась методом индентирования на микротвердомере Struers Duramin 5 (Дания) при нагрузке 25 г на алмазный наконечник Кнупа. Трибологические характеристики исследовались на трибометре (Беларусь), работающем по схеме «палец–диск» с использованием в качестве контртела шарика из стали ШХ15 с диаметром 5,5 мм и твердостью 63 HRC. Движение контртела осуществлялось по окружности с диаметром 20 мм при частоте вращения диска 80 об/мин без применения смазки. Нагрузка на образец составляла 1 Н. Исследование трибологических свойств проводилось при температуре $(23 \pm 1) ^\circ\text{C}$ и относительной влажности окружающей среды 50 %. В связи с существенно более высокой твердостью покрытия DLC : F по сравнению с твердостью контртела процессы изнашивания контактирующих тел оценивались по объему материала, удаленного с контртела, по формулам определения объема шарового сегмента. Для исследования влияния содержания фтора в покрытии DLC : F на поверхностную энергию покрытия использовалась стандартная методика определения угла смачиваемости. В качестве исходных материалов применялось вазелиновое масло (неполярное вещество) и дистиллированная вода (полярное вещество).

Полученные результаты и их анализ. Как показало исследование, добавление фторсодержащего газа существенным образом сказывается на формировании покрытия DLC : F. На рис. 2 показана зависимость скорости роста покрытия от давления CF₄. Как можно видеть, на начальном этапе добавка небольшого количества тетрафторметана приводит к возрастанию скорости осаждения, вероятно, за счет уменьшения десорбции радикалов ацетилена и атомов углерода из-за повышения общего давления газов в вакуумной камере, что в свою очередь приводит к увеличению вероятности их встраивания в структуру растущего покрытия. Рост давления более 5 мПа вызывает линейное уменьшение скорости роста покрытия DLC : F. В условиях избытка CF₄ ионы фтора начинают действовать как травящий агент, способствующий образованию летучих соединений фтора с углеродом и их удалению откачной системой оборудования. Косвенно такое предположение подтверждается тем, что в атмосфере чистого газа CF₄ наблюдается формирование покрытия минимальной толщины порядка 0,10–0,12 мкм в течение даже 4 ч работы ионного источника.

Характерный спектр энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) на примере образца № 3, на котором присутствуют линии углерода и фтора, а также основы – кремниевой пластины, представлен на рис. 3. Данные по элементному составу для всех образцов приведены в табл. 2. Можно видеть, что максимальное содержание фтора в покрытии достигает 31 ат.% при давлении фторметана порядка 10 мПа. Похожие результаты получены в [4], в данном исследовании покрытия DLC : F осаждались из смеси CF₄ : CH₄, где по мере роста содержания фторметана в газовой смеси увеличивалась концентрация фтора в покрытии. Также подобные результаты отмечены в работе [10], в которой тонкие пленки CF_x были получены методом магнетронного осаждения из смесей газов Ar/CF₄ Ar/C₄F₈. Сообщается, что в зависимости от давления реакционного газа содержание фтора в покрытии находилось в пределах 15–35 ат.%. Это коррелирует с результатами,

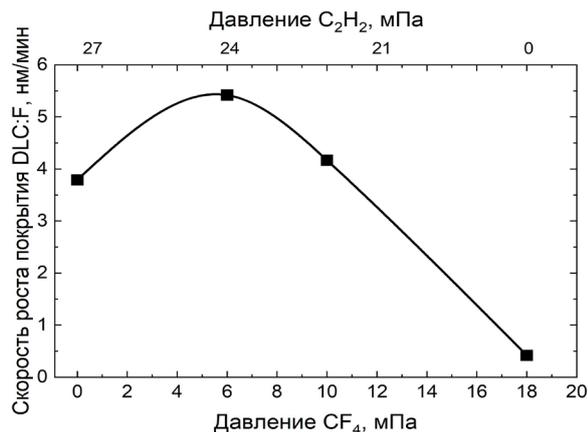


Рис. 2. Влияние давления CF₄ на скорость роста покрытия DLC : F

Fig. 2. Effect of CF₄ pressure on the growth rate of the DLC : F coating

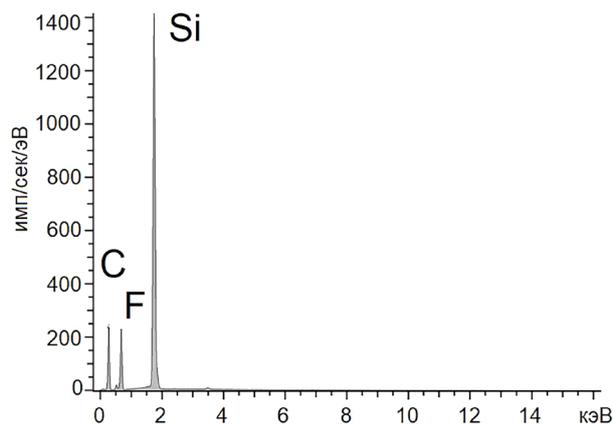


Рис. 3. Энергодисперсионный спектр покрытия DLC : F

Fig. 3. Energy-dispersive spectrum of DLC : F coating

полученным авторами настоящей работы. Обращает на себя внимание тот факт, что полученное при разложении чистого фторметана покрытие (образец 4) содержит меньше фтора, чем покрытия, полученные при разложении смеси газов CH₂/CF₄. Вероятно, этот факт объясняется активной ролью «избыточного» фтора в качестве травителя, что согласуется с данными по скорости осаждения покрытия DLC : F (см. рис. 2).

Таблица 2. Содержание химических элементов в покрытии DLC : F
 Table 2. Content of chemical elements in the DLC : F coating

Химический элемент	Содержание химического элемента, ат.%			
	Образец 1	Образец 2	Образец 3	Образец 4
C	100	94,33	68,76	84,67
F	0	5,67	31,24	15,33

На рис. 4 представлены обзорные спектры КРС для полученных покрытий. Предварительно все спектры были нормированы, то есть был вычтен фоновый сигнал фотолюминесценции, наличие которого является признаком частичной полимеризации формируемого покрытия [11]. Результаты показывают усиление асимметрии основного пика в области низких частот с ростом увеличения пропорции CF₄ : C₂H₂. Наиболее выражено этот эффект наблюдается для покрытия, полученного только из CF₄, когда на спектре становятся заметными два максимума в области 1400 и 1600 см⁻¹. Чтобы численно описать форму спектров, было выполнено разложение полученного сигнала на составляющие, соответствующие G- и D-пикам, характерным для алмазоподобных покрытий [12], определено их положение и ширина G пика, а также отношение интегральных интенсивностей D и G пиков I_D/I_G. Последний параметр является наиболее важным, так как низкочастотные колебания, соответствующие D-пику, означают наличие в покрытии DLC нанодисперсных графитоподобных структур, а его относительная интенсивность пропорциональна количеству графитоподобной

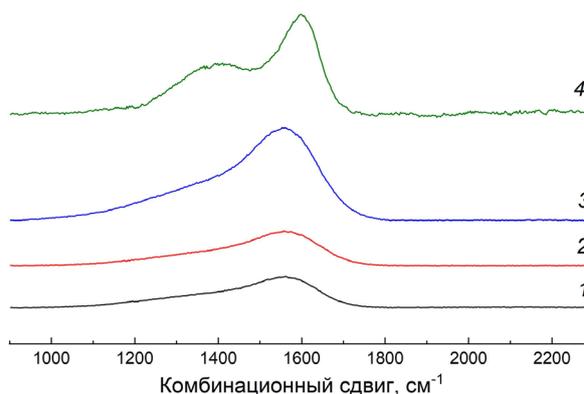


Рис. 4. Спектры комбинационного рассеяния света для покрытий DLC : F, полученных при частичном давлении CF₄ в газовой смеси 0 мПа (кривая 1), 6 мПа (кривая 2), 10 мПа (кривая 3), 18 мПа (кривая 4)

Fig. 4. Raman spectra for DLC : F coatings obtained at a partial pressure of CF₄ in a gas mixture of 0 mPa (curve 1), 6 mPa (curve 2), 10 mPa (curve 3), 18 mPa (curve 4)

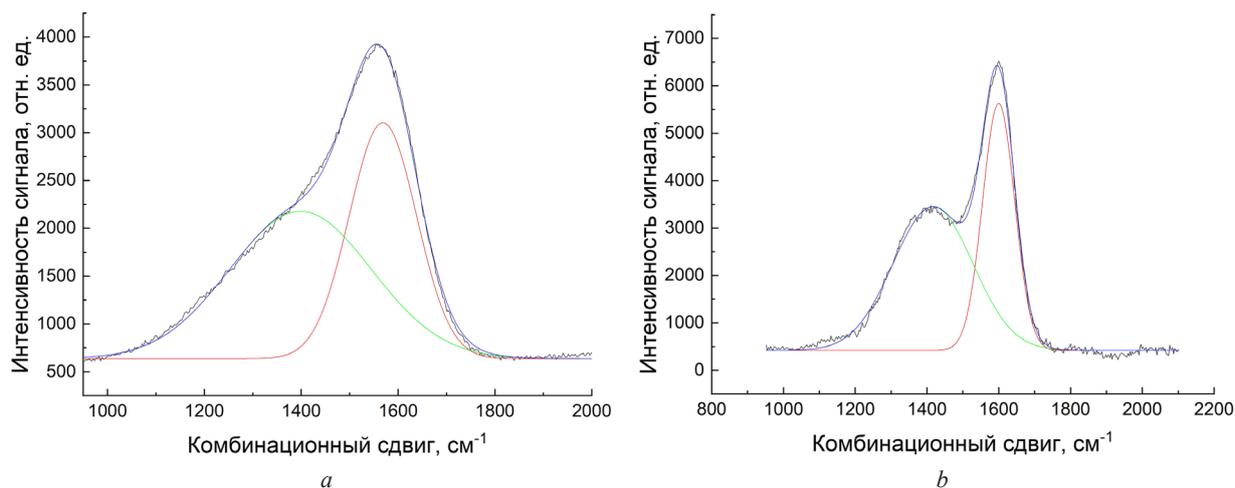


Рис. 5. Спектры комбинационного рассеяния света для образца 1 (a) и образца 4 (b)

Fig. 5. Raman spectra for the sample 1 (a) and for the sample 4 (b)

фазы. Результаты обработки спектров КРС для покрытий DLC (образец 1) и DLC : F (образец 4) приведены на рис. 5. Данные анализа спектров КРС представлены в табл. 3.

Результаты анализа спектров КРС показывают, что для покрытий, полученных при разложении смеси газов C_2H_2 и CF_4 , наблюдается незначительное смещение положения максимумов пиков D и G в область низких частот. В то же время увеличение содержания фтора в покрытии (см. табл. 2) приводит к повышению амплитуды сигнала G -пика при одновременном уменьшении его площади. Для D -пика наблюдается обратная картина. Таким образом, можно утверждать, что фтор в покрытии способствует росту отношения I_D/I_G и повышению графитной составляющей покрытия. Отдельно стоит упомянуть образец 4, полученный при деструкции только CF_4 в ионном пучке. Для такого материала структурные свойства существенно отличаются от предыдущих результатов, о чем говорит заметное смещение позиций D - и G -пиков в область высоких частот при минимальных значениях отношения I_D/I_G для всех полученных образцов покрытий, что означает уменьшение графитной составляющей вследствие ее преимущественного вытравливания фтором.

Таблица 3. Параметры спектров комбинационного рассеяния света для покрытий DLC : F

Table 3. Raman spectra parameters for DLC : F coatings

№ образца	Положение максимума пика, cm^{-1}		Ширина пика, cm^{-1}		I_D/I_G
	D	G	ΔD	ΔG	
1	1398,37	1568,53	0,70	163,87	0,76
2	1394,96	1568,26	0,64	148,05	0,89
3	1392,84	1564,25	0,55	145,46	0,90
4	1416,43	1599,54	0,61	89,48	0,69

В табл. 4 представлены результаты измерений, показывающие различный уровень взаимодействия покрытия с полярными/неполярными диэлектриками в соответствии с изменением содержания фтора в образце покрытия. Углы смачивания покрытия DLC : F при контакте с вазелиновым маслом имеют низкие значения, что говорит о гидрофильном характере взаимодействия между поверхностями. При этом по мере роста содержания фтора контактный угол существенно уменьшается. Иной характер носит взаимодействие фторсодержащего покрытия с дистиллированной водой. Контактные углы в данном случае имеют достаточно большие значения, что свидетельствует о преимущественно гидрофобном характере взаимодействия поверхностей.

Влияние содержания фтора в пленках алмазоподобного углерода на поверхностную энергию очень заметно. Как упоминается в [5], помимо небольшой доли $-C-CH-$ и $-C-O-$ связей, в покрытиях DLC : F присутствуют $C-C-$, $C-CF-$, $-CF-$ и $-CF_2-$ связи, где $C-C$ -связь является основой для тонкопленочного материала.

Таблица 4. Влияние содержания фтора на поверхностную энергию покрытий DLC : F

Table 4. Effect of fluorine content on the surface energy of DLC : F coatings

Параметр	Номер образца			
	1	2	3	4
Угол смачивания вазелинового масла, град	19,7	15,6	13,55	16,8
Угол смачивания водой, град	64,7	66,3	71,6	68,5
Дисперсионная компонента поверхностной энергии, мДж/м ²	8,3	6,4	2,7	4,9
Полярная компонента поверхностной энергии, мДж/м ²	82,4	76,0	59,4	69,5
Поверхностная энергия покрытия, мДж/м ²	90,8	82,3	62,2	74,4

Тип связей и их содержание изменяется с увеличением содержания фтора следующим образом: число C–CF-связей уменьшается, а число связей –CF увеличивается, в то время как поверхностная энергия уменьшается. В частности, при содержании фтора около 30 ат.% появляется связь –CF₂, содержание которой также увеличивается с ростом концентрации F. Связи, относящиеся к F, имеют соответствующую тенденцию влиять на поверхностную энергию. Таким образом, изменение поверхностной энергии в основном обусловлено сокращением числа C–CF-связей, а также ростом –CF- и –CF₂-связей с поверхностью покрытия. Влияние микроструктуры пленки на поверхностную энергию незначительно. Поверхностная энергия возникает от неуравновешенности сил между атомами или молекулами внутри и на границе раздела сред. Полярная составляющая является результатом взаимодействия постоянных и индуцированных диполей и образования водородных связей, тогда как дисперсионная компонента обусловлена силами взаимодействия, возникающими в результате флуктуаций пространственного распределения зарядов в молекулах [13]. Таким образом, изменение C–CF-, –CF- и –CF₂-связей в сторону уменьшения дисперсионной компоненты значительно снижает поверхностную энергию пленки.

Как видно из сопоставления данных табл. 2 и 4, имеет место монотонное уменьшение поверхностной энергии фторсодержащих покрытий DLC с увеличением содержания фтора. При этом данная зависимость для диапазона содержания фтора 0–31 ат.% является линейно убывающей, как показано на рис. 6. Наименьшую поверхностную энергию имеет образец 3 с содержанием фтора свыше 30 ат.%. Ее значение 62 мДж/м² в 1,5 раза ниже по сравнению с покрытием, не содержащим фтор.

Покрытия, полученные только из ацетилена, демонстрируют твердость порядка 35 ГПа (рис. 7). В то же время следует учесть тот факт, что толщина исследуемых образцов покрытий составляла около 0,3 мкм, потому измерялась твердость не самого покрытия, а системы «покры-

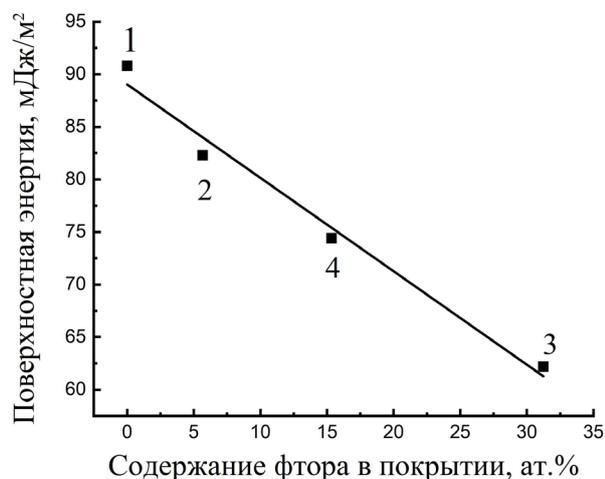


Рис. 6. Зависимость поверхностной энергии покрытия DLC : F от содержания фтора; 1–4 – номера образцов
 Fig. 6. Dependence of the surface energy of the DLC : F coating on the fluorine content; 1–4 – numbers of the sample

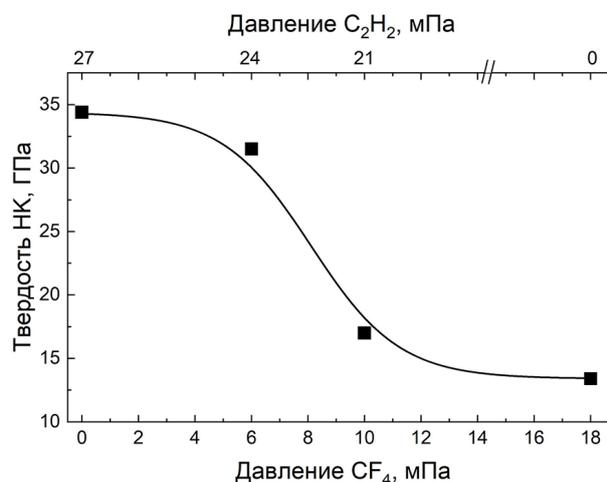


Рис. 7. Влияние отношения давления газов C₂H₂ : CF₄ на твердость покрытия DLC : F
 Fig. 7. Influence of the gas pressure ratio C₂H₂ : CF₄ on the hardness of the DLC : F coating

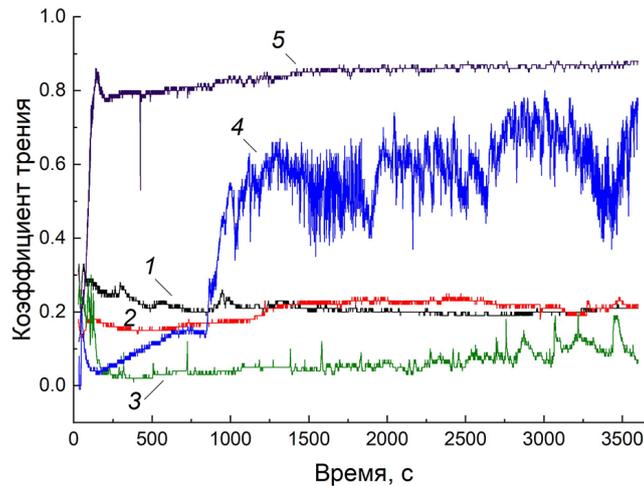


Рис. 8. Коэффициент трения покрытий DLC : F при давлении CF_4 0 мПа (кривая 1), 6 мПа (кривая 2), 10 мПа (кривая 3), 18 мПа (кривая 4), а также кремниевой основы (кривая 5)

Fig. 8. Coefficient of friction of DLC : F coatings at CF_4 pressure 0 mPa (curve 1), 6 mPa (curve 2), 10 mPa (curve 3), 18 mPa (curve 4), as well as silicon base (curve 5)

тие – основа», так как глубина индентирования составила около 30 % от толщины покрытия, что существенно больше регламентируемых < 10 % (ГОСТ 9450-76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников»). Это значит, что в действительности можно ожидать гораздо более высоких значений твердости полученных покрытий.

Результаты измерений показывают более чем двукратное снижение твердости до 14 ГПа по мере увеличения давления фтора в диапазоне 0–18 мПа. Аналогичные результаты получены в [5, 6], где в качестве газа-прекурсора углерода использовался метан и было установлено, что с увеличением отношения $CF_4 : CH_4$ твердость и модуль упругости покрытий DLC : F уменьшаются. Самая низкая твердость покрытия составляла 16 ГПа.

Одной из причин уменьшения твердости формируемой пленки являются изменения в ее микроструктуре с преобладанием содержания sp^2 -гибридизированных атомов углерода, то есть покрытия становятся более графитизированными при большем содержании фтора в них. Другой возможной причиной является уменьшение внутренних напряжений в покрытиях из-за содержания фтора в покрытиях [10].

Результаты трибологических испытаний представлены на рис. 8. Покрытия DLC, полученные при разложении ацетилена, демонстрируют устоявшийся коэффициент трения порядка 0,2. Небольшая добавка тетрафторметана к ацетилену в пропорции 1 : 1,6 существенно не изменила характер трения. В то же время в период приработки, в течение первых 10 мин испытаний, коэффициент трения покрытий составил около 0,16 и существенно ниже, чем для покрытий DLC (около 0,23). Рост отношения $CF_4 : C_2H_2$ до 1 : 2 позволил получить покрытие DLC : F с рекордно низким коэффициентом трения – порядка 0,03.

Однако после 40 мин испытаний коэффициент трения для данного образца вырос до 0,08, при этом на графике трения хорошо заметны выбросы сигнала по амплитуде до 0,15. Это характерно для пар трения, образующих довольно большое количество твердых частиц – продуктов изнашивания, попадание которых в зону контакта трибопары приводит к всплескам на кривой трения.

Для образца покрытия DLC : F, полученного в атмосфере только CF_4 , низкий коэффициент трения порядка 0,03 наблюдался в течение 3–5 мин после приработки контактирующих поверхностей. Затем наступило частичное разрушение покрытия в силу его малой толщины, что повлекло за собой увеличение коэффициента трения до значений 0,4–0,7.

Важной трибологической характеристикой твердых покрытий является их изнашивающая способность, определяемая по потере веса или объема контртела в результате, как правило, абразивного изнашивания. Для прецизионных пар трения, например подшипников качения, она часто выступает главной причиной выхода их из строя [14].

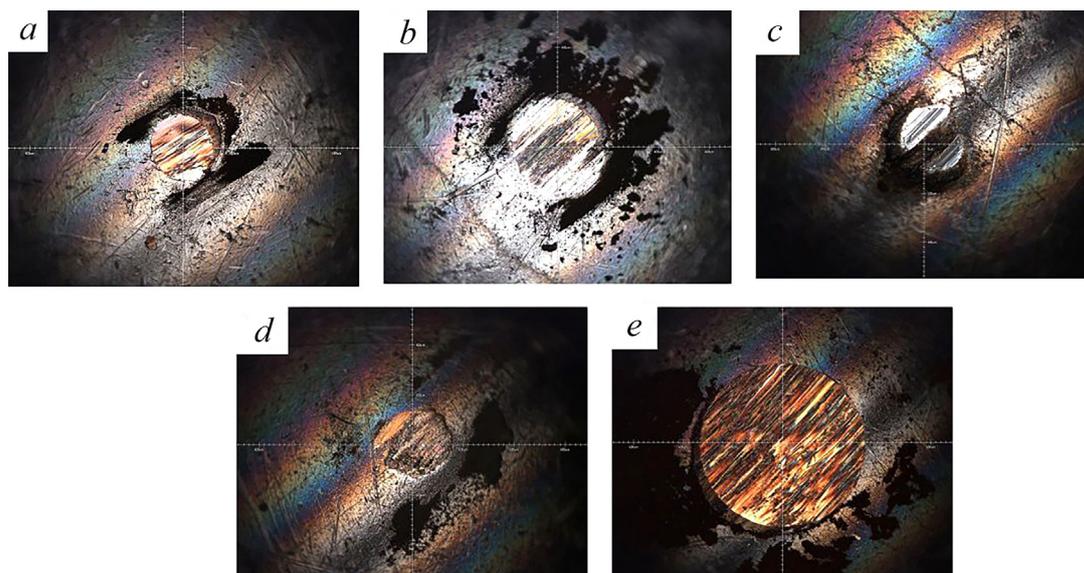


Рис. 9. Область износа контр-тела после трения с покрытием DLC : F, полученным при давлении CF_4 0 мПа (a); 6 мПа (b); 10 мПа (c); 18 мПа (d) и с чистым кремнием (e)

Fig. 9. Area of wear of the counter-body after friction with the DLC : F coating obtained at a CF_4 pressure of 0 mPa (a); 6 mPa (b); 10 mPa (c); 18 mPa (d) and with pure silicon (e)

На рис. 9 представлено полученное при увеличении 10^{\times} изображение области износа стального контртела, по которому можно характеризовать контактные процессы в зоне трения. Изнашивание стального шарика происходит равномерно и сопровождается формированием площадки в виде круга, что дает возможность довольно точно рассчитать износ контртела. На периферии дорожки трения скапливаются твердые частицы, являющиеся продуктами изнашивания стального шарика и в меньшей степени – покрытия (на рис. 9 они имеют вид черных размытых участков). Наличие интерференционных полос свидетельствует о разогреве зоны контакта и близлежащих участков, достаточном для формирования оксидных пленок металлов, из которых состоит контртело (цветные полосы в зоне трибологического контакта и вокруг них). Расчеты выделяющейся удельной тепловой мощности в зоне трения дают значения от 30 до 180 мВт/мм^2 для малых и сравнительно высоких коэффициентов трения соответственно, что вполне достаточно для значительного нагрева при испытаниях на трение в течение 1 ч. Данные по диаметру пятна контакта (\varnothing), объемного износа ($V_{\text{изн}}$) и скорости изнашивания контртела (W) при контакте с различными покрытиями DLC : F приведены в табл. 5.

Таблица 5. Износ контртела ШХ15

Table 5. Wear of counter-body ШХ15

Параметр	Номер образца				Образец без покрытия
	1	2	3	4	
Диаметр пятна контакта, \varnothing , мм	0,25	0,40	0,35	0,32	0,68
Объемный износ, $V_{\text{изн}}$, $\text{мм}^3 \cdot 10^{-5}$	7,2	47,5	27,8	19,4	398,3
Скорость изнашивания контртела, W , $\text{мм}^3/\text{Нм} \cdot 10^{-7}$	4,0	26,2	15,5	10,7	220,0

Присутствие фтора в покрытии алмазоподобного углерода несколько повышает износ контртела, но в то же время без покрытия этот параметр в 8–20 раз выше при трении стального шарика с таким материалом, как твердый полированный кремний. Износ покрытия в целом закономерно снижается с уменьшением коэффициента трения. Наименьшую изнашивающую способность имеет образец покрытия 1, полученный без фтора, для которого износ стального шарика по сравнению с кремниевой пластиной без покрытия уменьшается в 55 раз. Несмотря на то что фторсодержащие покрытия имеют значительно более низкие значения коэффициента трения, их изна-

шивающая способность является существенно более высокой. Возможным объяснением этому факту является особенность структуры фторированных DLC-покрытий, терминирующим элементом которых является фтор или фрагменты связей C–CF, –CF и –CF₂ [15]. Фтор, будучи сильным окислителем, при трибоконтакте активно взаимодействует с обновляемой поверхностью металла, вызывая его повышенное химико-абразивное изнашивание.

Заключение. Таким образом, в результате проведенного исследования установлено, что использование CVD метода получения покрытий из ионных источников позволяет получать покрытия DLC : F с содержанием фтора до 31 ат.%. Методами КРС показано, что присутствие фтора в покрытии DLC способствует формированию в нем нанодисперсных графитоподобных структур. Фторсодержащие покрытия DLC являются более мягким алмазоподобным материалом с большим содержанием sp²-связанных атомов углерода и фрагментов графита. Такие покрытия обладают очень низким (на уровне 0,03–0,07) коэффициентом трения в силу малого значения поверхностной энергии, которая при достаточно большом содержании фтора (порядка 30 ат.%) может быть снижена в 1,5 раза. На изнашивающую способность покрытий сильное влияние оказывает наличие фтора, вызывающее, по всей видимости, химико-абразивное изнашивание материала контртела.

Результаты исследований могут быть использованы для разработки технологии получения твердосмазочных материалов в узлах трения, представляющих интерес прежде всего для медицины, пищевой промышленности, производства пластмасс, химических волокон.

Список использованных источников

1. Robertson, J. Diamond-like amorphous carbon / J. Robertson // *Mater. Sci. Eng.* – 2002. – Vol. R37. – P. 129–281. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)
2. Sánchez-López, J. C. Doping and Alloying Effects on DLC Coatings / J. C. Sánchez-López, A. Fernández // *Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Applications* / eds.: C. Donnet, A. Erdemir. – New York: Springer, 2008. – P. 311–338. https://doi.org/10.1007/978-0-387-49891-1_12
3. Effects of element doping on the structure and properties of diamond-like carbon films: a review / Haibo Sun [et al.] // *Lubricants*. – 2023. – Vol. 11, № 4. – Art. ID 186. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040186>
4. Properties of fluorinated amorphous diamond like carbon films by PECVD / G. Q. Yu [et al.] // *Appl. Surf. Sci.* – 2003. – Vol. 219, Iss. 3–4. – P. 228–237. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00644-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00644-5)
5. Deposition of PTFE thin films by ion beam sputtering and a study of the ion bombardment effect / J. L. He [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. – 1998. – Vol. 135, Iss. 1–4. – P. 512–516. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(97\)00630-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(97)00630-7)
6. Guo-Qing Yu. Effects of thermal annealing on amorphous carbon nitride films by r. f. PECVD / Guo-Qing Yu, Seung-Hoon Lee, Jung-Joong Lee // *Diam. Relat. Mater.* – 2002. – Vol. 11, Iss. 9. – P. 1633–1637. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00111-5)
7. Bacterial deposition to fluoridated and non-fluoridated polyurethane coatings with different elastic modulus and surface tension in a parallel plate and a stagnation point flow chamber / D. P. Bakker [et al.] // *Colloids Surf. B: Biointerfaces*. – 2003. – Vol. 32, Iss. 3. – P. 179–190. [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(03\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(03)00159-0)
8. Antibacterial activity of fluorine incorporated DLC films / M. Ishihara [et al.] // *Diam. Relat. Mater.* – 2006. – Vol. 15, Iss. 4–8. – P. 1011–1014. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2005.12.037>
9. Memming, R. Properties of polymeric layers of amorphous hydrogenated carbon produced by a plasma-activated chemical vapour deposition process I: Spectroscopic investigations / R. Memming // *Thin Solid Films*. – 1986. – Vol. 143, Iss. 3. – P. 279–289. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(86\)90181-1](https://doi.org/10.1016/0040-6090(86)90181-1)
10. Reactive high power impulse magnetron sputtering of CF_x thin films in mixed Ar/CF₄ and Ar/C₄F₈ discharges / S. Schmidt [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2013. – Vol. 542. – P. 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.05.165>
11. Ferrari, A. C. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon / A. C. Ferrari, J. Robertson // *Phys. Rev. B*. – 2000. – Vol. 61, № 20. – P. 14095–14107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>
12. Ferrari, A. C. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond / A. C. Ferrari, J. Robertson // *Philos. Trans.: Math., Phys. Eng. Sci.* – 2004. – Vol. 362, Iss. 1824. – P. 2477–2512. <https://doi.org/10.1098/rsta.2004.1452>
13. Surface energy of amorphous carbon films containing iron / J. Chen [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2001. – Vol. 89, Iss. 12. – P. 7814–7819. <http://doi.org/10.1063/1.1375808>
14. Котов, С. Ю. Влияние вакуумно-плазменного упрочнения элементов качения на долговечность подшипника / С. Ю. Котов, Г. Я. Беляев // *Наука и техника*. – 2014. – № 2. – С. 57–61.
15. Relationship between static friction and surface wettability of orthodontic brackets coated with diamond-like carbon (DLC), fluorine- or silicone-doped DLC coatings / Sh. Akaike [et al.] // *Diam. Relat. Mater.* – 2016. – Vol. 61. – P. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.11.016>

References

1. Robertson J. Diamond-like amorphous carbon. *Materials Science and Engineering*, 2002, vol. R37, pp. 129–281. [https://doi.org/10.1016/S0927-796X\(02\)00005-0](https://doi.org/10.1016/S0927-796X(02)00005-0)
2. Sánchez-López J. C., Fernández A. Doping and alloying effects on DLC coatings. Donnet C., Erdemir A. (eds.). *Tribology of Diamond-Like Carbon Films: Fundamentals and Applications*. New York, Springer, 2008, pp. 311–338. https://doi.org/10.1007/978-0-387-49891-1_12
3. Haibo Sun, Lv Yang, Huaichao Wu, Limei Zhao. Effects of element doping on the structure and properties of diamond-like carbon films: a review. *Lubricants*, 2023, vol. 11, no 4, art. ID 186. <https://doi.org/10.3390/lubricants11040186>
4. Yu G. Q., Tay. B. K., Sun Z., Pan L. K. Properties of fluorinated amorphous diamond like carbon films by PECVD. *Applied Surface Science*, 2003, vol. 219, iss. 3–4, pp. 228–237. [https://doi.org/10.1016/S0169-4332\(03\)00644-5](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(03)00644-5)
5. He J. L., Li W. Z., Wang L. D., Wang J., Li H. D. Deposition of PTFE thin films by ion beam sputtering and a study of the ion bombardment effect. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 1998, vol. 135, iss. 1–4, pp. 512–516. [https://doi.org/10.1016/S0168-583X\(97\)00630-7](https://doi.org/10.1016/S0168-583X(97)00630-7)
6. Guo-Qing Yu, Seung-Hoon Lee, Jung-Joong Lee. Effects of thermal annealing on amorphous carbon nitride films by r. f. PECVD. *Diamond and Related Materials*, 2002, vol. 11, iss. 9, pp. 1633–1637. [https://doi.org/10.1016/S0925-9635\(02\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S0925-9635(02)00111-5)
7. Bakker D. P., Huijs F. M., Vries J. de, Klijnstra J. W., Busscher H. J., Mei H. C. van der. Bacterial deposition to fluoridated and non-fluoridated polyurethane coatings with different elastic modulus and surface tension in a parallel plate and a stagnation point flow chamber. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2003, vol. 32, iss. 3, pp. 179–190. [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(03\)00159-0](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(03)00159-0)
8. Ishihara M., Kosaka T., Nakamura T., Tsugawa K., Hasegawa M., Kokai F., Koga Y. Antibacterial activity of fluorine incorporated DLC films. *Diamond and Related Materials*, 2006, vol. 15, iss. 4–8, pp. 1011–1014. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2005.12.037>
9. Memming R. Properties of polymeric layers of amorphous hydrogenated carbon produced by a plasma-activated chemical vapour deposition process I: Spectroscopic investigations. *Thin Solid Films*, 1986, vol. 143, iss. 3, pp. 279–289. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(86\)90181-1](https://doi.org/10.1016/0040-6090(86)90181-1)
10. Schmidt S., Goyenola C., Gueorguiev G. K., Jensen J., Greczynski G., Czigány Zs., Hultman L. Reactive high power impulse magnetron sputtering of CF_x thin films in mixed Ar/CF_4 and Ar/C_4F_8 discharges. *Thin Solid Films*, 2013, vol. 542, pp. 21–30. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2013.05.165>
11. Ferrari A. C., Robertson J. Interpretation of Raman spectra of disordered and amorphous carbon. *Physical Review B*, 2000, vol. 61, no. 20, pp. 14095–14107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.61.14095>
12. Ferrari A. C., Robertson J. Raman spectroscopy of amorphous, nanostructured, diamond-like carbon, and nanodiamond. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2004, vol. 362, iss. 1824, pp. 2477–2512. <https://doi.org/10.1098/rsta.2004.1452>
13. Chen J., Lau S. P., Tay B. K., Chen G. Y., Sun Z., Tan Y. Y., Tan G., Chai J. W. Surface energy of amorphous carbon films containing iron. *Journal of Applied Physics*, 2001, vol. 89, iss. 12, pp. 7814–7819. <http://doi.org/10.1063/1.1375808>
14. Kotov S. Yu., Belyaev G. Ya. Influence of rolling element vacuum-plasma strengthening on bearing life. *Nauka i tekhnika = Science & Technique*, 2014, no. 2, pp. 57–61 (in Russian).
15. Akaïke Sh., Kobayashi D., Aono Y., Hiratsuka M., Hirata A., Hayakawa T., Nakamura Y. Relationship between static friction and surface wettability of orthodontic brackets coated with diamond-like carbon (DLC), fluorine- or silicone-doped DLC coatings. *Diamond and Related Materials*, 2016, vol. 61, pp. 109–114. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2015.11.016>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)**ЭНЕРГЕТИКА, ТЕПЛО- И МАССООБМЕН**
POWER ENGINEERING, HEAT AND MASS TRANSFER<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>
УДК 614.844.5:614.844.2*Оригинальная статья***А. Н. Камлюк^{*}, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор***Университет гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь,
ул. Машиностроителей, 25, 220118, Минск, Республика Беларусь***ЗАВИСИМОСТЬ ОБЪЕМНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ НИЗКОКРАТНЫХ ПЕН
ОТ ИХ КРАТНОСТИ**

Аннотация. Проведен анализ и обобщение результатов экспериментальных исследований характеристик воздушно-механической пены, получаемой на розеточных оросителях и в пеногенерирующих устройствах с сетками, при использовании трех марок пенообразователей общего назначения, одной марки пенообразователя специального назначения и одной марки пенообразователя, применяемого для тушения пожаров в качестве смачивателя. В результате анализа установлена линейная зависимость объемной устойчивости пены от ее кратности, а также определено влияние физических характеристик (показателя смачивающей способности, поверхностного натяжения и динамической вязкости) и скорости струи раствора пенообразователя на коэффициент пропорциональности установленной зависимости. Данная зависимость связывает устойчивость и кратность пены не только при использовании розеточных оросителей, применяемых в автоматических установках пожаротушения, но и насадков на пожарные стволы и иных пеногенерирующих устройств, позволяющих генерировать воздушно-механическую пену низкой кратности, а также не зависит от геометрических размеров используемых устройств. Полученное уравнение позволяет определять устойчивость пен через значение их кратности, что сократит время и денежные затраты на экспериментальное определение устойчивости.

Ключевые слова: объемная устойчивость пены, кратность пены, капиллярное число, показатель смачивающей способности, канал Плато–Гиббса, пеногенерирующее устройство

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Камлюк Андрей Николаевич – кандидат физико-математических наук, доцент, заместитель начальника по научной и инновационной деятельности Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. <https://orcid.org/0000-0002-9347-0778>. E-mail: kan@ucp.by; Лихоманов Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматических систем безопасности Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. <https://orcid.org/0000-0002-9374-1486>. E-mail: alexlikh20@gmail.com; Говор Эдуард Геннадьевич – ведущий научный сотрудник отдела научной и инновационной деятельности Университета гражданской защиты Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь. <https://orcid.org/0000-0002-4040-3264>. E-mail: govor-098@mail.ru

Вклад авторов: Камлюк Андрей Николаевич – постановка целей и задач исследования, анализ полученных экспериментальных данных, закономерностей и зависимостей характеристик пены и физических свойств пенообразователей, из которых она получена, интерпретация результатов исследования, редактирование текста рукописи; Лихоманов Алексей Олегович – проведение экспериментальных исследований по определению кратности и объемной устойчивости пены, а также влияния концентрации пенообразователя в растворе на показатель смачивающей способности и кратность пены, работа с графическим материалом; Говор Эдуард Геннадьевич – проведение экспериментальных исследований по определению кратности и объемной устойчивости пены, экспериментальное определение физических свойств исследуемых пенообразователей, набор текста статьи.

Для цитирования: Камлюк, А. Н. Зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности / А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер.фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 194–205. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>

Поступила в редакцию: 21.06.2024

Доработанный вариант: 09.09.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article

Andrei N. Kamluk*, **Alexey O. Likhomanov**, **Eduard G. Govor**

*University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
25, Mashinostroiteley Str., 220118, Minsk, Republic of Belarus*

DEPENDENCE OF THE VOLUME STABILITY ON THE EXPANSION RATE OF LOW-EXPANSION FOAM

Abstract. In this work, we analyzed and summarized the results of experimental studies of the characteristics of air-mechanical foam generated on the deflector type sprinklers and in the foam generating devices with mesh using three brands of general purpose foam concentrates, one brand of special purpose foam concentrate and one brand of foam concentrate used to extinguish fires as a wetting agent. As a result of the analysis, a linear dependence of the volume stability on the expansion rate of the foam was established, and the influence of physical characteristics (wetting ability, surface tension and dynamic viscosity) and the jet speed of the foam concentrate solution on the proportionality coefficient of the established dependence was determined. This dependence relates the stability and expansion rate of foam not only when using deflector type sprinklers for automatic extinguishing systems, but also using nozzles of fire barrels and other foam-generating devices that allow the generation of low-expansion air-mechanical foam, and does not depend on the geometric dimensions of the devices used. The resulting equation makes it possible to determine the stability of foams using the value of their expansion rate. It will help to reduce the time and money spent on experimental determination of the foam stability.

Keywords: foam volume stability, foam expansion rate, Capillary number, wetting ability, Plateau–Gibbs border, foam generating device

Conflict of interest: the authors declare that they have no conflict of interest.

Information about the authors: *Andrei N. Kamluk* – Cand. Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Deputy Chief on Scientific and Innovative Activity at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-9347-0778>. E-mail: kan@ucp.by; *Alexey O. Likhomanov* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Chair of Automatic System Security at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-9374-1486>. E-mail: alexlikh20@gmail.com; *Eduard G. Govor* – Leading Researcher of the Department of Scientific and Innovation Activity at University of Civil Protection of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus. <https://orcid.org/0000-0002-4040-3264>. E-mail: govor-098@mail.ru.

Contribution of the authors: *Andrei N. Kamluk* – the determination of the aims and objectives of the study, analysis of the experimental data, determination of patterns and dependencies of the characteristics of the foam and the physical properties of the foaming agents, interpretation of the research results, editing the text of the manuscript; *Alexey O. Likhomanov* – carrying out experimental studies to determine the expansion rate and volume stability of foam, as well as the influence of the concentration of the foaming agent in the solution on the wetting ability and foam expansion rate, working with graphic; *Eduard G. Govor* – carrying out experimental studies to determine the expansion rate and volume stability of foam, experimental determination of the physical properties of the foam concentrates, writing the text of the manuscript.

For citation: Kamluk A. N., Likhomanov A. O., Govor E. G. Dependence of the volume stability on the expansion rate of low-expansion foam. *Vesti Natsyonal'nai akademii nauk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 194–205 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-194-205>

Received: 21.06.2024

Modified: 09.09.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. Наиболее широко применяемыми огнетушащими веществами при ликвидации пожаров являются вода и воздушно-механическая пена низкой кратности (далее – пена) [1]. Последнее вещество обладает лучшей огнетушащей эффективностью, а в случае тушения пожаров с легковоспламеняющимися и горючими жидкостями – единственным эффективным средством. В свою очередь огнетушащая эффективность пен в значительной степени зависит от устойчивости C (время, в течение которого пена способна сохранять свой объем и препятствовать

вытеканию жидкости (синерезису)) и кратности K (величина, равная отношению объема пены к объему водного раствора пенообразователя (ПО), содержащегося в ней) [2, 3].

Следует отметить, что высокая устойчивость объема пены необходима не только при тушении пожаров, но и при покрытии взлетно-посадочной полосы пеной при аварийной посадке самолета без шасси, а также для предотвращения испарения легковоспламеняющихся жидкостей и химически опасных веществ при их разливе. Данный параметр важен и при покрытии пеной площадки резервуара для изоляции жидкости после тушения [4].

По кратности пены делятся на три группы в зависимости от условий применения (способа тушения, вида горючего материала, типа пенообразователя и др.): низкой (от 3,6 до 20), средней (21–200) и высокой (более 200) кратности [3]. Авторами статьи исследовалась пена низкой кратности, так как она обладает большей проникающей способностью, лучшей растекаемостью по поверхности и эффективнее охлаждает горящие поверхности по сравнению с другими группами пен. В работах разных авторов отмечается, что чем выше значение кратности [5, 6] или устойчивости [6] пен, тем быстрее будет ликвидирован пожар при наименьшем расходе огнетушащего вещества. Повлиять на значения данных характеристик можно изменением как состава огнетушащего вещества (использование пенообразователей различных типов и марок), так и гидродинамических характеристик струи огнетушащего вещества (скорость, давление), и даже геометрии устройств, предназначенных для генерирования пены. До настоящего времени не было проведено обобщение результатов исследований кратности и объемной устойчивости пены с учетом перечисленных факторов, с помощью которых можно изменять данные характеристики пены.

Цель исследования – обобщить результаты исследований авторов статьи, установить влияние физических характеристик растворов пенообразователей различных типов и марок на объемную устойчивость и кратность пены, а также их взаимосвязь при нормальных условиях.

Обзор исследований характеристик пен. Первые попытки установить связь между устойчивостью (C) и кратностью (K) пены были предприняты еще в 1940-е годы. В частности Г. Д. Майлс вывел следующее выражение [7]:

$$C = \frac{8\eta}{\rho g r^2} (V + a \cdot \lg V + b), \quad (1)$$

где η – динамическая вязкость раствора пенообразователя; ρ – плотность раствора пенообразователя; g – ускорение свободного падения; r – средний радиус пузырька; V – объем жидкости, оставшийся в пене к моменту времени, соответствующему разрушению 25 % ее объема; a и b – коэффициенты, которые зависят от начального объема жидкости в пене и ее высоты.

Учитывая, что кратность (K) – это отношение объема пены (V_n) к объему жидкости (V), уравнение (1) можно представить в виде

$$C = \frac{8\eta}{\rho g r^2} \left(\frac{V_n}{K} + a \cdot \lg \frac{V_n}{K} + b \right). \quad (2)$$

Уравнение (2) не получило широкого применения на практике прежде всего из-за того, что в него входит неизвестная величина – средний радиус пузырька пены, значение которого зависит от множества факторов. Кроме того, константы a и b существенно зависят от начальных условий пенообразования. Принимая во внимание обратно-пропорциональную зависимость среднего радиуса пузырька пены от ее кратности $r = f(1/K)$ [8], выражение (2) можно представить в виде $C = f(K)$.

Пропорциональность устойчивости пены ее кратности была предсказана К. Б. Канном [9], однако коэффициент пропорциональности установлен не был. Сам факт определения данного коэффициента имеет большое значение и позволяет без проведения экспериментальных исследований установить значение устойчивости пены, зная ее кратность, и наоборот. Это подтверждает актуальность и значимость изучения природы такой пропорциональности при проведении текущих исследований.

Более сложную зависимость между устойчивостью и кратностью пены можно встретить в исследовании Т. Е. Шавниной [10]. В данной работе в рамках фрактально-перколяционной модели удалось установить зависимость устойчивости пены от свойств раствора пенообразователя и ее

кратности. Но, к сожалению, на практике пользоваться полученной зависимостью крайне неудобно по причине ее громоздкости. Кроме того, в [10], как и в уравнении (2), не удалось выразить зависимость устойчивости пены от ее кратности без среднего радиуса пузырька пены.

Следует отметить, что в [7–10] исследования устойчивости пены осуществлялись при нормальных условиях без термического воздействия на пену. Для определения эффективности пожаротушения пенами выполняются сравнительные натурные испытания, которые требуют не только больших материальных затрат, но и строгого выполнения требований безопасности и экологичности. Такие исследования целесообразны только после детального анализа лабораторных испытаний при нормальных условиях. При невозможности выполнить натурные испытания допускаются исследования термической устойчивости пены в лабораторных условиях. Так, в [11] приводятся результаты таких исследований для пен различной кратности. А. В. Кокшаров с соавторами установили, что пена низкой кратности разрушается медленнее, чем пены средней и высокой кратности. Кроме того, скорость термического разрушения низкократных пен не зависит от численного значения кратности ($v_p \approx 0,15$ см/с) и соизмерима со скоростью разрушения таких пен при нормальных условиях ($v_p \approx 0,12$ см/с) [12]. Ранее такой эффект наблюдался авторами [13] при стабилизации пены натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы, когда из-за повышенной вязкости жидкой фазы она не успевала пройти по пенным каналам при разрушении пены, в результате чего скапливалась на поверхности пены, защищая ее от разрушения.

Исходя из результатов анализа различных исследований термической устойчивости авторами настоящей статьи определена важность исследований объемной устойчивости пены при нормальных условиях.

Исследование кратности и объемной устойчивости пены. Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены водные растворы различных марок пенообразователей, отличающихся как химическим составом, так и назначением. Авторы отобрали наиболее широко используемые пенообразователи общего назначения (тип S^1) трех марок: ПО-6РЗ (6 %), Синтек-6НС (6 %) и Люкс S (6 %). При этом для оценки влияния типа пенообразователя в дополнение к пенообразователям общего назначения были взяты: пенообразователь специального назначения (фторсодержащий пленкообразующий типа AFFF¹) марки Люкс AFFF (6 %) и пенообразователь, применяемый для тушения пожаров в качестве смачивателя (тип WA¹) марки ОПС-0,4 (1 %). Как правило, в скобках в названии марки пенообразователя указывается рекомендуемая производителем рабочая объемная концентрация данного вещества в растворе для эффективного пожаротушения.

Водные растворы пенообразователей для исследований приготавливались с рекомендуемой производителем рабочей концентрацией пенообразователя. В табл. 1 представлены основные физические характеристики рабочих растворов отобранных пенообразователей. Значения коэффициента поверхностного натяжения (σ), плотности (ρ) и динамической вязкости (η) водного раствора каждого пенообразователя были определены экспериментально при использовании сертифицированного и поверенного в установленном порядке лабораторного оборудования: автоматического тензиометра Kruss K20, весов лабораторных МАССА-К ВК-1500, колбы мерной 1000 мл (ГОСТ 1770-74)², капиллярного вискозиметра ВПЖ-4 1.47 и секундомера механического СОСпр-2а-3-000.

Т а б л и ц а 1. Физические характеристики водных растворов пенообразователей
 Table 1. Physical characteristics of aqueous solutions of foaming agents

Характеристика раствора пенообразователя	Марка пенообразователя				
	ПО-6РЗ (6 %)	Синтек-6НС (6 %)	Люкс S (6 %)	Люкс AFFF (6 %)	ОПС-0,4 (1 %)
Плотность, ρ , кг/м ³	1000,7 ± 0,1	1003,4 ± 0,1	1000,9 ± 0,1	1002,6 ± 0,1	1000,1 ± 0,1
Поверхностное натяжение, $\sigma \cdot 10^3$, Н/м	22,455 ± 0,054	29,045 ± 0,021	26,165 ± 0,013	16,637 ± 0,095	31,225 ± 0,105
Динамическая вязкость, $\eta \cdot 10^3$, (Н · с)/м ²	1,01 ± 0,01	1,04 ± 0,01	1,08 ± 0,01	1,03 ± 0,01	1,02 ± 0,01

¹ Вещества огнетушащие. Пенообразователи для тушения пожаров. Общие технические требования. Методы испытаний: СТБ 2459-2016. Взамен СТБ ГОСТ Р 50588-99; введ. 12.08.2016. Минск, Госстандарт, 2016. 50 с.

² Посуда мерная лабораторная стеклянная. Цилиндры, мензурки, колбы, пробирки. Общие технические условия: ГОСТ 1770-74. URL: <https://meganorm.ru/Index2/1/4294835/4294835121.htm>

Экспериментальные исследования проводились на установке, схема которой представлена в [12]. Раствор подавался на ороситель, после чего сгенерированная пена собиралась в мерной емкости. Давление перед оросителем задавалось на уровне 0,1 МПа и контролировалось по показаниям манометра. Затем при помощи весов определялась масса пены в емкости и рассчитывалась ее кратность по формуле

$$K = V_{\text{емк}} \rho / (m_2 - m_1), \quad (3)$$

где $V_{\text{емк}}$ – объем емкости, м³; ρ – плотность раствора пенообразователя, кг/м³; m_1 – масса емкости, кг; m_2 – масса емкости, заполненной пеной, кг.

Для определения устойчивости пены открывался кран, смонтированный на сливном отверстии емкости, и с помощью секундомера определялось время разрушения 25 % объема пены по мерной шкале, намеченной на емкости.

Для изменения гидродинамических параметров использовались штуцеры оросителя с различным значением диаметра выходного отверстия D_h (рис. 1), которые позволяют обеспечить различную скорость струи v при постоянном давлении, создаваемом насосной установкой. Для обобщения экспериментальных данных использовались характеристические числа Вебера (We) и Рейнольдса (Re) [12].

Учесть геометрию пеногенерирующих устройств удалось путем использования конструкции сборно-разборного оросителя¹, которая позволяет использовать составные части оросителя (дужки и розетку) с различными геометрическими параметрами (L – длина дужек, d – внутренний диаметр розетки, D_y – проекция внешнего диаметра розетки на горизонтальную плоскость, a – длина лопасти розетки, τ – угол лопасти розетки; α – угол конусности лопастей розетки) (рис. 2). Для исследований основными параметрами геометрии оросителя были приняты: L – длина дужек, мм; α – угол конусности лопастей розетки, град; D – внешний диаметр розетки, мм; K_s – коэффициент рабочей поверхности розетки.

Внешний диаметр розетки выражается через внутренний диаметр и длину лопастей розетки следующим образом: $D = d + 2a$. Коэффициент рабочей поверхности розетки K_s представляет собой отношение площади поверхности розетки, взаимодействующей с потоком жидкости в процессе разбрызгивания раствора пенообразователя, и мнимой площади заполненной поверхности розетки (без пустых промежутков между лопастями розетки) и рассчитывается по формуле [12]

$$K_s = \frac{360d^2 \sin \alpha + \sum \tau (D_y^2 - d^2)}{360(d^2 \sin \alpha + D_y^2 - d^2)} \cdot 100\%. \quad (4)$$

При проведении экспериментальных исследований использовались конфигурации розеточного оросителя со следующими значениями параметров геометрии: $L = 30, 50$ и 150 мм; $K_s = 50, 64$ и 100 %; $D = 20, 50$ и 100 мм и $\alpha = 15^\circ, 30^\circ$ и 45° . Ранее авторами изучалось влияние геометрических параметров составных частей розеточного оросителя и гидродинамических параметров

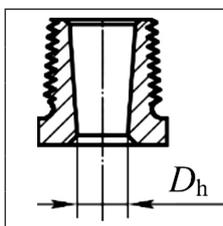
	Номер штуцера	D_h , мм	v , м/с	$v_{\text{сп}}$, м/с
	№ 1	10,0	14,9	10,7
	№ 2	11,0	13,8	
	№ 3	13,5	10,2	
	№ 4	15,7	8,5	
№ 5	17,6	6,2		

Рис. 1. Внешний вид экспериментальных образцов штуцера оросителя для автоматических установок пожаротушения с указанием диаметра выходного отверстия D_h [14]

Fig. 1. Appearance of experimental samples of a sprinkler fitting for automatic extinguishing systems, indicating the diameter of its outlet D_h [14]

¹ Сборно-разборный дренчерный ороситель: полез. модель ВУ 11801 / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин, А. О. Лихоманов, Э. Г. Говор. Опубл. 30.10.2018.

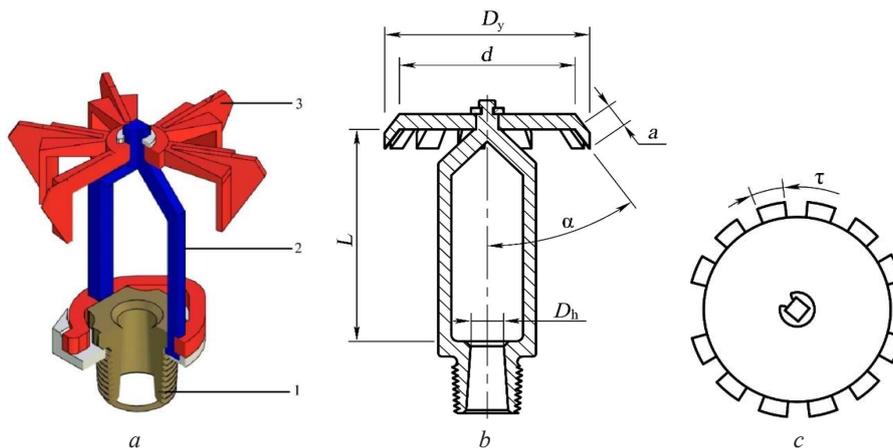


Рис. 2. Конструктивные элементы (а) и геометрические параметры (вид сбоку (b) и вид сверху (c)) сборно-разборного оросителя: 1 – штуцер; 2 – дужки; 3 – розетка; D_y – проекция внешнего диаметра розетки на горизонтальную плоскость; a – длина лопасти розетки; d – внутренний диаметр розетки; τ – угол лопасти розетки; α – угол конусности лопастей розетки; L – длина дужек

Fig. 2. Structural elements (a) and geometric parameters (side view (b) and top view (c)) of a dismantlable sprinkler: 1 is the fitting; 2 is the frame arm; 3 is the deflector; D_y is the projection of the outer diameter of the deflector onto the horizontal plane; a is the length of the deflector tine; d is the inner diameter of the deflector; τ is the angle of the deflector tine; α is the taper angle of the deflector tine; L is the length of frame arm

струй водных растворов различных пенообразователей на кратность и устойчивость пены [6, 12, 15]. Экспериментальные исследования проводились по плану полного факторного эксперимента (далее – ПФЭ) [14]. При пяти факторах, каждый из которых имел три уровня, план ПФЭ состоял из 243 серий опытов для каждой марки пенообразователя (с целью уменьшения погрешности измерений каждая серия состояла из пяти экспериментов). Таким образом, общее количество экспериментов составило 6075.

В результате получены значения кратности (K) и устойчивости (C) пены для исследуемых пенообразователей [12, 14]. Установлена зависимость данных характеристик от марки используемого пенообразователя, гидродинамических характеристик струи огнетушащего вещества (We), а также от геометрических характеристик пеногенерирующих устройств. Графики полученных зависимостей для кратности и устойчивости пены имеют схожий вид и пропорциональны друг другу [14]. В итоге обработки значительного массива экспериментальных данных было установлено, что зависимости C от K имеют линейный вид (рис. 3) и отличаются только углом наклона к оси абсцисс:

$$C = \gamma \cdot K, \quad (5)$$

где γ – коэффициент пропорциональности, с.

Сопоставив результаты экспериментальных данных, полученных в [8], при использовании пенообразователя Синтек-6НС (6 %) прослеживается аналогичная зависимость устойчивости (C) пены от ее кратности (K) с коэффициентом $\gamma \approx 11$, что коррелирует с результатами экспериментальных исследований для пенообразователя Синтек-6НС (6 %), полученными в настоящей работе (рис. 3, график 2).

Разрушение пены, капиллярное число и смачивающая способность растворов пенообразователей. Очевидно, что коэффициент пропорциональности должен зависеть прежде всего от физических характеристик и свойств водных растворов используемых пенообразователей. Чтобы понять, что включает в себя коэффициент γ , необходимо рассмотреть причины разрушения пены. Нарушение устойчивости пены (C) на начальном этапе связано с процессом самопроизвольного стекания жидкости пены по каналам Плато–Гиббса, что приводит к утончению пленок пузырьков и впоследствии к их разрушению [2, 3, 16, 17]. Этот процесс вызван в основном действием сил гравитации и капиллярных сил всасывания.

В узком канале Плато–Гиббса граница раздела жидкости с газом принимает искривленную форму (мениск), вогнутую в случае смачивания жидкостью стенок капилляра. Вогнутый мениск

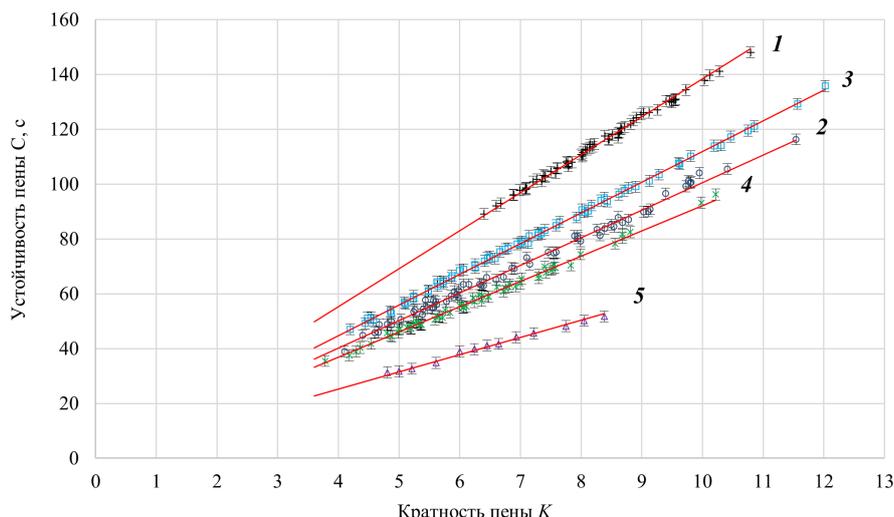


Рис. 3. Зависимость устойчивости пены C от ее кратности K [14]: 1 – ПО-6РЗ (6%), $\gamma = 13,84 \pm 0,24$; 2 – Синтек-6НС (6%), $\gamma = 10,05 \pm 0,24$; 3 – Люкс S (6%), $\gamma = 11,19 \pm 0,24$; 4 – Люкс АFFF (6%), $\gamma = 9,21 \pm 0,24$; 5 – ОПС-0,4 (1%), $\gamma = 6,30 \pm 0,24$

Fig. 3. The dependence of foam stability C on its expansion rate K : 1 – PO-6RZ (6%), $\gamma = 13,84 \pm 0,24$; 2 – Sintek-6NS (6%), $\gamma = 10,05 \pm 0,24$; 3 – Luks S (6%), $\gamma = 11,19 \pm 0,24$; 4 – Luks AFFF (6%), $\gamma = 9,21 \pm 0,24$; 5 – OPS-0.4 (1%), $\gamma = 6,30 \pm 0,24$

создает под своей поверхностью разрежение (отрицательное давление), которое заставляет жидкость затекать в капилляры со смачиваемыми стенками, в том числе против силы тяжести, что играет важную роль для сохранения устойчивости пены. Исходя из этого можно предположить, что коэффициент пропорциональности γ из формулы (5) связан с капиллярными силами и смачивающей способностью раствора пенообразователя.

В гидродинамике капиллярное число – это критерий подобия, выражающий соотношение между силами вязкого трения и поверхностного натяжения, действующими на границе раздела жидкость – газ. Этот критерий широко применяется для описания поведения пористых сред [18, 19], а при рассмотрении однофазных потоков является отношением We к Re [20]:

$$Ca = \frac{v_{cp} \cdot \eta}{\sigma} = \frac{We}{Re}, \quad (6)$$

где v_{cp} – средняя скорость струи водного раствора пенообразователя, м/с.

Так, пузырек воздуха имеет тенденцию деформироваться трением потока жидкости в капиллярах из-за эффектов вязкости, а силы поверхностного натяжения стремятся минимизировать площадь поверхности. В настоящей работе значение капиллярного числа находилось в диапазоне $0,350 \leq Ca \leq 0,662$ (табл. 2).

Таблица 2. Значения коэффициента γ и капиллярного числа Ca в зависимости от используемого пенообразователя

Table 2. The values of coefficient γ and capillary number Ca depending on the foaming agent

Характеристика раствора пенообразователя	Пенообразователь				
	ПО-6РЗ (6%)	Синтек-6НС (6%)	Люкс S (6%)	Люкс АFFF (6%)	ОПС-0,4 (1%)
Коэффициент пропорциональности γ, c	$13,84 \pm 0,24$	$10,05 \pm 0,24$	$11,19 \pm 0,24$	$9,21 \pm 0,24$	$6,30 \pm 0,24$
Капиллярное число Ca	$0,481 \pm 0,006$	$0,383 \pm 0,004$	$0,442 \pm 0,004$	$0,662 \pm 0,010$	$0,350 \pm 0,005$

Смачивающая способность характеризуется, как правило, углом смачивания (или краевым углом смачивания), который образуется касательными плоскостями к межфазным поверхностям, ограничивающим смачивающую жидкость, а его вершина лежит на линии раздела трех фаз. Однако при определении смачивающей способности жидкостей, имеющих в своем составе поверхностно-

активные вещества (ПАВ), которые обеспечивают полное или практически полное растекание (смачивание) по гидрофильной поверхности, данный метод не дает высокую степень воспроизводимости. В связи с этим для исследования смачивающей способности водных растворов пенообразователей используется показатель смачивающей способности. Данный показатель определяется с помощью общепринятого метода, суть которого сводится к определению времени смачивания образца из хлопковой ткани, то есть с момента его погружения в испытуемый раствор пенообразователя с определенной объемной концентрацией до момента, когда образец ткани начинает тонуть (SN NS-EN 1772:2000¹, [21]).

Для определения показателя смачивающей способности авторами выполнены дополнительные эксперименты. Перед проведением исследований были подготовлены образцы круглой формы из неотбеленной хлопковой ткани диаметром (30 ± 1) мм, выдержанные при относительной влажности воздуха около 65 % в течение 3 сут. При температуре воды (28 ± 2) °С были приготовлены экспериментальные образцы водных растворов пенообразователей с рабочей концентрацией согласно паспорту: ПО-6РЗ – 6 %; Синтек-6НС – 6 %; Люкс S – 6 %; Люкс АFFF – 6 %; ОПС-0,4 – 1 %. Растворы затем охлаждались до достижения температуры (20 ± 1) °С. Образец из хлопковой ткани, помещенный в зажимное приспособление, вертикально погружали в стакан вместимостью 1000 мл и диаметром дна 95 мм, в который предварительно заливался раствор пенообразователя в объеме 700 мл. Одновременно с погружением образца из ткани в раствор фиксировалось время с момента погружения и до момента, когда образец из хлопковой ткани свободно начинал тонуть. Полученное время принималось за показатель смачивающей способности. Эксперимент проводился 5 раз с раствором каждого из исследуемых пенообразователей. Полученные результаты представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Значения коэффициента γ в зависимости от используемого пенообразователя
 Table 3. The values of coefficient γ depending on the foaming agent

Характеристика раствора пенообразователя	Марка пенообразователя				
	ПО-6РЗ (6 %)	Синтек-6НС (6 %)	Люкс S (6 %)	Люкс АFFF (6 %)	ОПС-0,4 (1 %)
Коэффициент пропорциональности, γ, c	$13,84 \pm 0,24$	$10,05 \pm 0,24$	$11,19 \pm 0,24$	$9,21 \pm 0,24$	$6,30 \pm 0,24$
Показатель смачивающей способности, τ_{cm}, c	$6,67 \pm 0,01$	$3,43 \pm 0,01$	$4,03 \pm 0,01$	$5,29 \pm 0,01$	$2,41 \pm 0,01$
Отношение $\tau_{cm}/Ca, c$	13,86	8,96	9,12	7,99	6,9
Отклонение τ_{cm}/Ca от $\gamma, \%$	+0,14%	-10,85%	-18,50%	-13,25%	+9,52%

Влияние физических характеристик растворов пенообразователей на коэффициент пропорциональности. Важно отметить, что исследуемый в работе коэффициент пропорциональности γ , как и параметры, которые его определяют, зависит от концентрации раствора пенообразователя. Поэтому здесь следует пояснить, почему для проведения исследований используется именно рабочая концентрация пенообразователя, рекомендуемая производителем. Известно, что при изменении объемной концентрации пенообразователя показатель смачивающей способности может существенно варьироваться. Так, в стандарте ASTM D2 281-10(2016)² приведен график зависимости показателя смачивающей способности от концентрации пенообразователя, из которого видно, что при изменении объемной концентрации пенообразователя от 0,2 до 6,0 % показатель смачивающей способности может изменяться от 2 до 87 с, что является существенной разницей.

Для изучения влияния концентрации пенообразователя в растворе на показатель смачивающей способности авторами были проведены собственные экспериментальные исследования с применением растворов различной концентрации и получены зависимости $\tau_{cm} = f(c)$. При анализе результатов было учтено требование¹, согласно которому минимально допустимая объемная концентрация пенообразователя в растворе должна быть не менее концентрации, при которой

¹ Surface active agents – Determination of wetting power by immersion: SN NS-EN 1772:2000 (ISO 8022:1990 modified). URL: <https://docs.cntd.ru/document/431948578> (date of application: 10.12.2023).

² Standard Test Method for Evaluation of Wetting Agents by the Skein Test: ASTM D2 281-10(2016). 2016. Vol. 15.04. 3 p. <https://doi.org/10.1520/D2281-10R16>

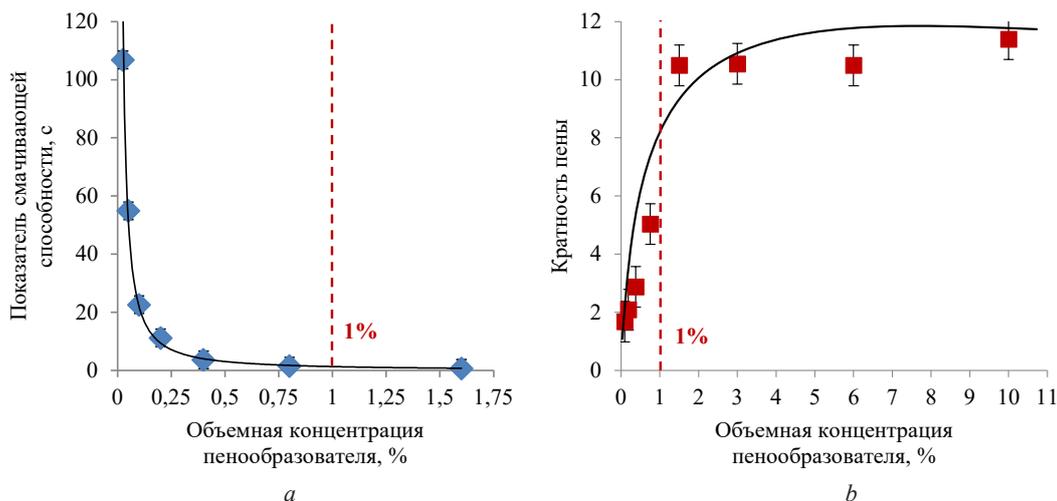


Рис. 4. Зависимость показателя смачивающей способности (а) и кратности образующейся пены (b) от объемной концентрации пенообразователя ОПС-0,4 в растворе

Fig. 4. The dependence of the wetting ability index (a) and the expansion rate of the foam (b) on the volume concentration of the OPS-0.4 foaming agent

значение показателя смачивающей способности составляет 45 с. При этом не менее важным критерием является поддержание более высокого значения кратности пены. В ходе эксперимента по определению зависимости кратности пены от объемной концентрации пенообразователя в растворе $K = f(c)$ использовалась специальная установка [21]. Эксперимент проводился по стандартной методике (см. SN NS-EN 1772:2000).

На рис. 4 представлены графики зависимости показателя смачивающей способности и кратности пены от объемной концентрации пенообразователя ОПС-0,4. Рабочая концентрация данного пенообразователя, установленная производителем для получения пены низкой кратности, составляет 1 %.

Видно, что повышение концентрации пенообразователя в растворе выше рекомендуемой производителем не будет оказывать значительного влияния на смачивающую способность раствора и кратность получаемой из него пены, однако приведет к существенному перерасходу дорогостоящего пенообразователя. График зависимости при использовании других исследуемых пенообразователей имеет аналогичный вид: до значений концентрации растворов пенообразователей, рекомендованных их производителями, показатель смачивающей способности резко падает, а кратность быстро растет, после чего падение $\tau_{см}$ и рост K замедляются. Как установлено в [22, 23], повышение концентрации пенообразователя выше значения, установленного производителем, может приводить даже к снижению значения кратности пены, что крайне нежелательно при тушении пожаров. Поэтому в настоящем исследовании авторами использовалась только рабочая концентрация пенообразователей, установленная производителем.

Значения капиллярного числа Ca и показателя смачивающей способности $\tau_{см}$ при нормальных условиях окружающей среды, а также отношение $\tau_{см}$ к Ca представлены в табл. 3. Как уже упоминалось, коэффициент пропорциональности γ в формуле (5) в первую очередь зависит от физических характеристик водных растворов используемых пенообразователей ($\tau_{см}$, σ , η), а также от скорости струи ($v_{ср}$) данных растворов для генерирования пены:

$$\gamma = \frac{\tau_{см}}{Ca}, \quad (7)$$

при этом взаимосвязь объемной устойчивости и кратности пены:

$$C = \frac{\tau_{см}}{Ca} \cdot K \quad \text{либо} \quad C = \frac{\sigma \cdot \tau_{см}}{\eta \cdot v_{ср}} \cdot K. \quad (8)$$

Для исключения влияния способа получения пены на зависимость (7) авторы провели исследования устойчивости и кратности при генерировании пены на сетке с использованием пенообразователя

Люкс S (6 %). Выбор пенообразователя обусловлен тем, что для него наблюдается наибольшее отклонение теоретического коэффициента пропорциональности по формуле (7) от экспериментального в формуле (5) – 18,5 %. Вместо розеточного оросителя (см. рис. 2) в экспериментальной установке размещалось специальное пеногенерирующее устройство с сеткой, представленное на рис. 5 [24]. Данное пеногенерирующее устройство позволяет производить замену сетки (использовались сетки с размером ячеек $0,5 \times 0,5$; $1,0 \times 1,0$ и $3,2 \times 3,2$ мм) и устанавливать ее на различном расстоянии от выходного отверстия штуцера (50, 100 и 200 мм). Результаты генерирования пены на сетке представлены в табл. 4.

Отличия значений экспериментально определенного коэффициента пропорциональности γ при использовании розеточных оросителей и пеногенерирующих устройств с сеткой составили не более 8 %, что подтверждает вывод о том, что указанный коэффициент зависит только от физических характеристик водных растворов используемых пенообразователей и скорости их истечения для генерирования пены. Также следует отметить, что в эксперименте с генерированием пены на сетках отклонение теоретического значения ($\tau_{см}/Ca$) от экспериментального значения γ по аналогии с оросителями составило около 18 % ($\tau_{см}/Ca = 9,12$; $\gamma = 10,6$).

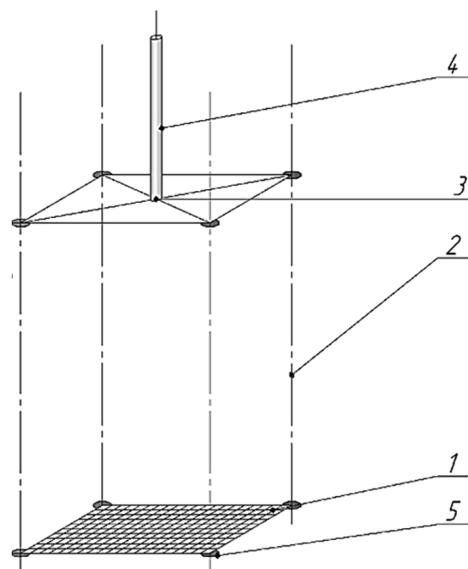


Рис. 5. Пеногенерирующее устройство с использованием сеток: 1 – сетка; 2 – металлические вертикальные ребра; 3 – держатель; 4 – трубопровод; 5 – фиксатор

Fig. 5. Foam generating device with mesh: 1 is the mesh; 2 is the metal vertical ribs; 3 is the holder; 4 is the pipeline; 5 is the retainer

Таблица 4. Результаты определения кратности и устойчивости при генерировании пены на сетке

Table 4. The results of determining expansion rate and stability of the foam using device with mesh

Линейные размеры ячейки сетки, мм	Расстояние установки сетки от выходного отверстия штуцера, мм	Экспериментальное значение K	Экспериментальное значение $K_{ср}$	Экспериментальное значение C , с	Экспериментальное значение $C_{ср}$, с	Экспериментальное значение γ для сеток	Экспериментальное значение γ для оросителей	Отклонение значений в столбцах 7 и 8
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,5 × 0,5	50	10,18	9,45	108,00	101,31	10,72	11,19	4,19 %
	100	9,89		106,33				
	200	8,28		89,60				
1,0 × 1,0	50	9,91	9,58	107,00	103,28	10,78	11,19	3,69 %
	100	9,49		101,50				
	200	9,35		101,33				
3,2 × 3,2	50	9,62	9,07	93,67	93,47	10,31	11,19	7,9 %
	100	9,17		96,50				
	200	8,42		90,25				

Заключение. В работе установлена линейная зависимость объемной устойчивости низкократных пен от их кратности с коэффициентом пропорциональности, равным отношению показателя смачивающей способности к капиллярному числу. Указанная зависимость справедлива как для пенообразователей общего (тип S), так и специального назначения (тип AFFF), а также для пенообразователей, применяемых для тушения пожаров в качестве смачивателя (тип WA) в исследованном в данной работе диапазоне изменения чисел We и Re и геометрических параметров пеногенерирующих устройств, применяемых для целей пожаротушения.

Полученное авторами выражение (7) связывает устойчивость и кратность пены не только при использовании розеточных оросителей, применяемых в автоматических установках пожаро-

тушения, но и насадков на пожарные стволы и иных пеногенерирующих устройств, позволяющих генерировать воздушно-механическую пену низкой кратности, а также не зависит от геометрических размеров используемых устройств.

Установленная зависимость позволяет определять устойчивость пен через значение их кратности, что сократит время и денежные затраты на экспериментальное определение устойчивости.

Список использованных источников

1. Романцов, И. И. Эффективность использования жидкофазных огнетушащих составов на объектах энергетики / И. И. Романцов, Е. И. Чалдаева // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность: материалы XXI Всерос. науч.-техн. конф., 2–4 дек. 2015 г., Томск: в 2 т. – Томск: СКАН, 2015. – Т. 2. – С. 160–164.
2. Вилкова, Н. Г. Свойства пен и методы их исследования / Н. Г. Вилкова. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 120 с.
3. Камлюк, А. Н. Компрессионная пена для нужд пожарных подразделений / А. Н. Камлюк, А. В. Грачулин. – Минск: Ун-т граждан. защиты, 2019. – 224 с.
4. Осипенко, С. И. Увеличение устойчивости противопожарной пены путем восполнения жидкой фазы при орошении / С. И. Осипенко, А. В. Кокшаров // Пожаровзрывобезопасность. – 2021. – Т. 30, № 4. – С. 65–73. <https://doi.org/10.22227/0869-7493.2021.30.04.65-73>
5. Изучение процессов тушения пламени нефтепродуктов низкократными пенами / В. М. Кучер [и др.] // Пожаротушение: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1984. – С. 29–37.
6. Kamluk, A. N. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers / A. N. Kamluk, A. O. Likhomanov, A. V. Grachulin // Fire Saf. J. – 2020. – Vol. 116. – P. 103177-1–103177-10. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103177>
7. Miles, G. D. Foam drainage / G. D. Miles, L. Shedlovsky, J. Ross // J. Phys. Chem. – 1945. – Vol. 49, № 1. – P. 93–101. <https://doi.org/10.1021/j150440a006>
8. Качанов, И. В. Установки автоматического пожаротушения с предварительной аэрацией огнетушащей рабочей среды / И. В. Качанов, И. В. Карпенчук, С. Ю. Павлюков. – Минск: БНТУ, 2018. – 149 с.
9. Канн, К. Б. Капиллярная гидродинамика пен / К. Б. Канн. – Новосибирск: Наука. Сибир. отд-ние, 1983. – 167 с.
10. Шевнина, Т. Е. Фрактально-перколяционный механизм разрушения пены: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 02.00.04 / Т. Е. Шевнина; Тюмен. госуд. ун-т. – Тюмень, 2004. – 26 с.
11. Кокшаров, А. В. Исследование термической устойчивости пены различной кратности / А. В. Кокшаров, С. И. Осипенко, Е. В. Гайнуллина // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 3. – С. 103–110. <https://doi.org/10.22227/PV.2020.29.03.103-110>
12. Камлюк, А. Н. Пенные оросители для автоматических установок пожаротушения / А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов, А. В. Грачулин. – Минск: Ун-т граждан. защиты, 2023. – 244 с.
13. Стабилизация пены низкой кратности натриевой солью карбоксиметилцеллюлозы / А. В. Кокшаров [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 10. – С. 79–83.
14. Говор, Э. Г. Исследование ключевых классификационных характеристик пены и влияния на них параметров розеточного оросителя / Э. Г. Говор, А. Н. Камлюк, А. О. Лихоманов // Вестн. Фонда фундамент. исслед. – 2024. – № 1 (107). – С. 86–96.
15. Kamluk, A. N. Increasing foam expansion rate by means of changing the sprinkler geometry / A. N. Kamluk, A. O. Likhomanov // Fire Saf. J. – 2019. – Vol. 109. – P. 102862-1–102862-8. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102862>
16. Мухамедиев, Ш. А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость. Ч. 1 / Ш. А. Мухамедиев, В. А. Васькина // Масла и жиры. – 2008. – № 10. – С. 22–26.
17. Мухамедиев, Ш. А. Эмульсии и пены: строение, получение, устойчивость. Ч. 2 / Ш. А. Мухамедиев, В. А. Васькина // Масла и жиры. – 2008. – № 11. – С. 2–5.
18. Попков, В. И. Гидродинамическое моделирование фильтрации при малых значениях капиллярного числа / В. И. Попков, С. В. Зацепина, В. П. Шакшин // Вестн. Самар. госуд. техн. ун-та. Сер.: Физико-математические науки. – 2005. – № 34. – С. 163–170.
19. Скрипкин, А. Г. Экспериментальные исследования кривой капиллярного осушения при ПАВ-полимерном заводнении / А. Г. Скрипкин, И. Н. Кольцов, С. В. Мильчаков // PRONEFT. Профессионально о нефти. – 2021. – Т. 6, № 1. – С. 40–46.
20. Günther, A. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis / A. Günther, K. F. Jensen // Lab on a Chip. – 2006. – Vol. 6. – P. 1487–1503. <https://doi.org/10.1039/b609851g>
21. Влияние концентрации пенообразователя на смачивающую способность и кратность пены при дозировании в автоматических спринклерных установках пожаротушения / А. О. Лихоманов [и др.] // Вестн. Ун-та граждан. защиты МЧС Беларуси. – 2024. – Т. 8, № 2. – С. 156–167. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.156>
22. Попов, А. Л. Влияние природы пенообразователей на физико-технические свойства пен / А. Л. Попов, В. В. Нелюбова, Д. Д. Нецвет // Вестн. Белгород. госуд. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2018. – № 3. – С. 5–12. https://doi.org/10.12737/article_5abfc9b7ce94e3.70688983
23. Горбач, П. С. Влияние пенообразователя на свойства пены и пенобетона / П. С. Горбач, С. А. Щербин // Вестн. Томск. госуд. архитектур.-строит. ун-та. – 2014. – № 5. – С. 126–132.
24. Влияние размеров ячейки сетки и расстояния от сопла на дисперсность пены / А. Н. Камлюк [и др.] // Вестн. Ун-та граждан. защиты МЧС Беларуси – 2022. – Т. 6, № 4. – С. 441–450. <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-4.441>

References

1. Romantsov I. I., Chaldaeva E. I. Efficiency of use of liquid-phase fire extinguishing compositions at power engineering facilities. *Materialy XXI Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Energetika: effektivnost', nadezhnost', bezopasnost'". T. 2* [Proceedings of the 21st All-Russian Scientific and Technical Conference "Power Engineering: Efficiency, Reliability, Safety". Vol. 2]. Tomsk, 2015, pp. 160–164 (in Russian).
2. Vilkova N. G. *Properties of Foams and Methods of Their Investigation*. Penza, Penza State University of Architecture and Construction, 2013. 120 p. (in Russian).
3. Kamluk A. N., Grachulin A. V. *Compression Foam for the Needs of Fire Brigades*. Minsk, University of Civil Protection, 2019. 224 p. (in Russian).
4. Osipenko S. I., Koksharov A. V. Increasing the stability of the fire extinguishing foam by replenishing the liquid phase during sprinkling. *Fire and Explosion Safety*, 2021, vol. 30, no. 4, pp. 65–73 (in Russian). <https://doi.org/10.2227/0869-7493.2021.30.04.65-73>
5. Kucher V. M., Merkulov V. A., Zhukov V. V., Kucher V. N., Ponimasov V. M. Study of oil products flame extinguishing processes by low-reddened foams. *Pozharotushenie: sbornik nauchnykh trudov* [Firefighting: a Collection of Scientific Papers]. Moscow, All-Union Scientific Research Institute of Fire Protection, 1984, pp. 29–37 (in Russian).
6. Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O., Grachulin A. V. Field testing and extinguishing efficiency comparison of the optimized for higher expansion rates deflector type sprinkler with other foam and foam-water sprinklers. *Fire Safety Journal*, 2020, vol. 116, pp. 103177-1–103177-10. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103177>
7. Miles G. D., Shedlovsky L., Ross J. Foam drainage. *Journal of Physical Chemistry*, 1945, vol. 49, no. 1, pp. 93–101. <https://doi.org/10.1021/j150440a006>
8. Kachanov I. V., Karpenchuk I. V., Pavlyukov S. Yu. *Automatic Fire Extinguishing Installations with Preliminary Aeration of the Fire Extinguishing Working Environment*. Minsk, Belarusian National Technical University, 2018. 149 p. (in Russian).
9. Kann K. B. *Capillary Hydrodynamics of Foam*. Novosibirsk, Nauka Publ. Siberian branch, 1983. 167 p. (in Russian).
10. Shevnina T. E. *Fractal Percolation Mechanism of Foam Destruction*. Tyumen, 2004. 26 p. (in Russian).
11. Koksharov A. V., Osipenko S. I., Gaynullina E. V. Study of the thermal stability of foam of different expansion ratio. *Fire and Explosion Safety*, 2020, vol. 29, no. 3, pp. 103–110 (in Russian). <https://doi.org/10.2227/PVB.2020.29.03.103-110>
12. Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O., Grachulin A. V. *Foam Sprinklers for Automatic Fire Extinguishing Systems*. Minsk, University of Civil Protection, 2023. 244 p. (in Russian).
13. Koksharov A. V., Markov V. F., Buchelnikov D. Yu., Terentyev V. V. Stabilization of high density foams sodium salt of carboxymethylcellulose. *Fire and Explosion Safety*, 2014, vol. 23, no. 10, pp. 79–83 (in Russian).
14. Govor E. G., Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O. Investigation of key foam classification characteristics and the influence of rosette sprinkler parameters on them. *Vestnik Fonda fundamental'nykh issledovaniy = Bulletin of the Foundation for Fundamental Research*, 2024, no. 1 (107), pp. 86–96 (in Russian).
15. Kamluk A. N., Likhomanov A. O. Increasing foam expansion rate by means of changing the sprinkler geometry. *Fire Safety Journal*, 2019, vol. 109, pp. 102862-1–102862-8. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102862>
16. Mukhamediev Sh. A., Vas'kina V. A. Emulsions and foams: structure, preparation, stability. Part 1. *Masla i zhiry* [Oils and Fats], 2008, no. 10, pp. 22–26 (in Russian).
17. Mukhamediev Sh. A., Vas'kina V. A. Emulsions and foams: structure, preparation, stability. Part 2. *Masla i zhiry* [Oils and Fats], 2008, no. 11, pp. 2–5 (in Russian).
18. Popkov V. I., Zatspeina S. V., Shakshin V. P. Hydrodynamic modeling of filtration at low capillary number values. *Journal of Samara State Technical University. Series: Physical and Mathematical Sciences*, 2005, no. 34, pp. 163–170 (in Russian).
19. Skripkin A. G., Kol'tsov I. N., Mil'chakov S. V. Experimental studies of the capillary desaturation curve in polymer-surfactant flooding. *PRONEFT. Professionally About Oil*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 40–46 (in Russian).
20. Günther A., Jensen K. F. Multiphase microfluidics: from flow characteristics to chemical and materials synthesis. *Lab on a Chip*, 2006, vol. 6, pp. 1487–1503. <https://doi.org/10.1039/b609851g>
21. Likhomanov A. O., Navrotskii O. D., Zhukovskii S. A., Kamluk A. N. The influence of foaming agent concentration on the wetting ability and foam expansion rate when dosing in automatic sprinkler systems. *Journal of Civil Protection*, 2024, vol. 8, no. 2, pp. 156–167 (in Russian). <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2024.8-2.156>
22. Popov A. L., Nelyubova V. V., Netsvet D. D. The influence of the foaming agents nature on physical and technical properties of foam. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov*, 2018, no. 3, pp. 5–12 (in Russian). https://doi.org/10.12737/article_5abfc9b7ce94e3.70688983
23. Gorbach P. S., Shcherbin S. A. The effect of the foaming agent on the properties of foam and foam concrete. *Journal of Construction and Architecture*, 2014, no. 5, pp. 126–132 (in Russian).
24. Kamlyuk A. N., Likhomanov A. O., Titovets A. F., Polochanin N. S., Grachulin A. V. Influence of the dimensions of the grid cell and the distance from it to the nozzle of the foam-generating device on the foam dispersion. *Journal of Civil Protection*, 2022, vol. 6, no. 4, pp. 441–450 (in Russian). <https://doi.org/10.33408/2519-237X.2022.6-4.441>

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>

УДК 66.047.7

Оригинальная статья**А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев****Витебский государственный технологический университет,
Московский пр., 72, 210038, Витебск, Республика Беларусь***КИНЕТИКА ВЛАГООБМЕНА В ПРОЦЕССЕ КОНВЕКТИВНОЙ СУШКИ
ТОНКИХ ПЛОСКИХ ВЛАЖНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Аннотация. Исследована кинетика конвективной сушки тонких влажных теплоизоляционных материалов на основе относительных скорости сушки и влагосодержаний. Обработкой опытных данных по сушке различных влажных материалов установлено, что относительная скорость процесса связана с относительными влагосодержаниями, представляющими собой отношения значения текущего влагосодержания к его критическому и начальному значениям. На основе функциональной зависимости относительной скорости сушки от относительных влагосодержаний обработкой экспериментальных данных по сушке керамики, войлока, асбеста получены уравнения для расчета длительности сушки. Представлена зависимость относительной скорости сушки от отношения текущего влагосодержания к критическому. Даны зональные методы расчета длительности процесса, основанные на кривой скорости сушки. Разработано выражение для определения коэффициента сушки. На основе анализа опытных данных по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока построены графики зависимости относительной скорости сушки от отношения текущего влагосодержания к начальному. Показаны зависимости для определения критического влагосодержания материала. Рассмотренный метод обработки опытных данных позволяет получить все основные уравнения для расчета кинетики процесса сушки. Дан вариант оценки длительности процесса по одному эксперименту с малым промежутком времени. Выполнено сравнение расчетных величин по уравнениям с экспериментом. Разброс расчетных значений находится в области погрешности эксперимента. Формулы для расчета длительности сушки, полученные без построения кривой скорости сушки, позволяют значительно сократить время обработки опытных данных и могут быть применимы к другим материалам.

Ключевые слова: влагосодержание, скорость сушки, коэффициент сушки, критическое влагосодержание, время сушки

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Ольшанский Анатолий Иосифович* – кандидат технических наук, доцент. <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Голубев Алексей Николаевич* – старший преподаватель кафедры «Технология машиностроения» Витебского государственного технологического университета. <https://orcid.org/0009-0004-5645-7912>. E-mail: tm@vstu.by

Вклад авторов: *Ольшанский Анатолий Иосифович* – сбор и анализ литературных данных, вывод зависимостей, проведение вычислений, написание текста рукописи, обсуждение результатов и выводов; *Голубев Алексей Николаевич* – работа с графическим материалом, редактирование текста рукописи, обсуждение результатов и выводов.

Для цитирования: Ольшанский, А. И. Кинетика влагообмена в процессе конвективной сушки тонких плоских влажных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Вест. нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 206–214. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>

Поступила в редакцию: 04.03.2024

Доработанный вариант: 09.09.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article**Anatoly I. Ol'shanskii, Alexey N. Golubev****Vitebsk State Technological University, 72, Moskovsky Ave., 210038, Vitebsk, Republic of Belarus***KINETICS OF MOISTURE EXCHANGE DURING CONVECTION DRYING
OF THIN FLAT WET MATERIALS**

Abstract. The kinetics of convective drying of thin wet thermal insulation materials based on the relative drying rate and relative moisture contents has been studied. Processing of experimental data on drying of various wet materials has established that the relative drying rate is related to the relative moisture contents, which are the ratios of the current moisture content

¹ Ольшанский А. И., Голубев А. Н., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

to its critical and initial values. Based on the functional dependence of the relative drying rate on the relative moisture contents using the processing of the experiment on drying of ceramics, felt, and asbestos, equations for calculating the drying time are obtained. The dependence of the relative drying rate on the ratio of the current moisture content to the critical one is given. Zonal methods for calculating the drying time are given, based on the drying rate curve. An expression for determining the drying coefficient is developed. Based on the analysis of experimental data on drying porous ceramics, sheet asbestos, and wool felt, graphs of the dependence of the relative drying rate on the ratio of the current moisture content to the initial one are constructed. Dependencies for determining the critical moisture content of the material are given. The considered method of processing experimental data allows obtaining all the main equations for calculating the kinetics of the drying process. A variant of estimating the drying time based on one experiment with a short time interval is given. A comparison of the calculated values according to the equations with the experiment is performed. The spread of the calculated values is in the range of experimental error. The formulas for calculating the drying time obtained without plotting the drying rate curve allow significantly reducing the time of processing the experimental data and can be applied to other materials.

Keywords: moisture content, drying speed, drying coefficient, critical moisture content, drying time

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Anatoly I. Ol'shanskii* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at Vitebsk State Technological University. <https://orcid.org/0009-0009-0000-6799>; *Alexey N. Golubev* – Senior Lecturer of the Department of Mechanical Engineering at Vitebsk State Technological University. <https://orcid.org/0009-0004-5645-7912>. E-mail: tm@vstu.by

Contribution of the authors: *Anatoly I. Ol'shanskii* – collection and analysis of literature data, derivation of dependencies, carrying out calculations, writing the text of the manuscript, discussion of results and conclusions; *Alexey N. Golubev* – work with graphic material, editing the text of the manuscript, discussion of results and conclusions.

For citation: Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. Kinetics of moisture exchange during convection drying of thin flat wet materials. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 4, pp. 206–214 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-206-214>

Received: 04.03.2024

Modified: 09.09.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. Основной задачей кинетики сушки является расчет длительности процесса, поскольку время сушки совместно с температурой определяет не только технологические свойства высушиваемого материала, но и конструкцию, размеры сушильной камеры, выбор метода сушки и способ подвода энергоносителя [1–4, 19]. Все необходимые зависимости для расчета продолжительности процесса сушки можно получить из решения дифференциального уравнения тепломассопереноса [1–5]. Однако теоретическое решение часто оказывается очень сложным, поскольку сушка – процесс нестационарный и коэффициенты тепломассообмена изменяются в зависимости от влагосодержания и температуры [1–5]. Невозможность получения точного аналитического решения вызывает необходимость в проведении экспериментальных исследований [2–7, 19–20]. Наиболее эффективными методами обработки опытных данных являются методы, которые основаны на наиболее общих закономерностях сушки, характеризующих общие свойства влажного тела [6, 8].

Цель исследования – получить на основе обработки опытных данных простые и надежные эмпирические уравнения для расчета длительности сушки.

Вывод расчетных формул. Эксперимент. Г. К. Филоненко и А. В. Лыковым была введена важная для кинетики сушки обобщенная переменная N^* – относительная скорость сушки [1–3, 8, 9]:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = f(\bar{u}), \quad (1)$$

где N – скорость сушки (мин^{-1}) в период постоянной скорости (первый период сушки), $d\bar{u}/d\tau$ – скорость сушки (с^{-1}) в период падающей скорости сушки (второй период сушки).

При разработке двухзонального метода расчета длительности сушки [8] В. В. Красников установил, что величина N^* не зависит от режима сушки и для конкретного материала при данном методе сушки является только функцией влагосодержания [1, 3, 8]. Выводы В. В. Красникова по относительной скорости сушки N^* совпадают с выводами Г. К. Филоненко [8, 9] относительно приведенной скорости сушки.

Анализ опытных данных по сушке ряда различных влажных материалов показал, что относительная скорость сушки N^* связана с относительными влагосодержаниями \bar{u}/\bar{u}_0 и $\bar{u}/\bar{u}_{\text{кр}}$ при

различных начальных и критических влагосодержаниях \bar{u}_0 и $\bar{u}_{кр}$ [1, 8–10]. Относительная скорость сушки N^* и переменная $\bar{u}/\bar{u}_{кр}$ связывают между собой все переменные процесса, где скорость в первом периоде N является главным связующим фактором [7, 10, 11]:

$$N^* = \frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = A \exp\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right). \quad (2)$$

В результате обработки эксперимента по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока получено уравнение для расчета длительности сушки во втором периоде [7]

$$\tau_{II} \approx \frac{\bar{u}_{кр}}{NA} \left[\ln\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}} + 1\right) \right], \quad (3)$$

где коэффициент A приближенно аппроксимируется выражением [7]

$$A \approx A_0 (\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{2,5},$$

а коэффициент A_0 является линейной функцией критического влагосодержания

$$A_0 \approx 2,36 + 2\bar{u}_{кр}.$$

Обработкой опытных данных по сушке пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока для режимов сушки $t_c = 90; 120$ °С, $v = 3; 5$ м/с получена формула

$$N^* \approx (\bar{u}/\bar{u}_{кр})^{1,3}. \quad (4)$$

На рисунке, b даны результаты обработки опытных данных по уравнению (4). Запишем уравнение (4) в виде:

$$-\frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{(\bar{u}/\bar{u}_{кр})^n} = d\tau; \quad -\frac{1}{N} \int_{\bar{u}_{кр}}^{\bar{u}} \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{-n} d\bar{u} = \int_0^{\tau_{II}} d\tau. \quad (5)$$

Интегрирование уравнения (5) дает время сушки в периоде падающей скорости:

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{N} \frac{\bar{u}_{кр}}{1-n} \left[\left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{1-n} - 1 \right]. \quad (6)$$

Для случая показателя степени $n > 1$ уравнение (6) можно записать в виде

$$\tau_{II} \approx \frac{1}{N} \left[\left(\frac{\bar{u}_{кр} - \bar{u}}{n-1}\right) \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_{кр}}\right)^{n-1} \right], \quad (7)$$

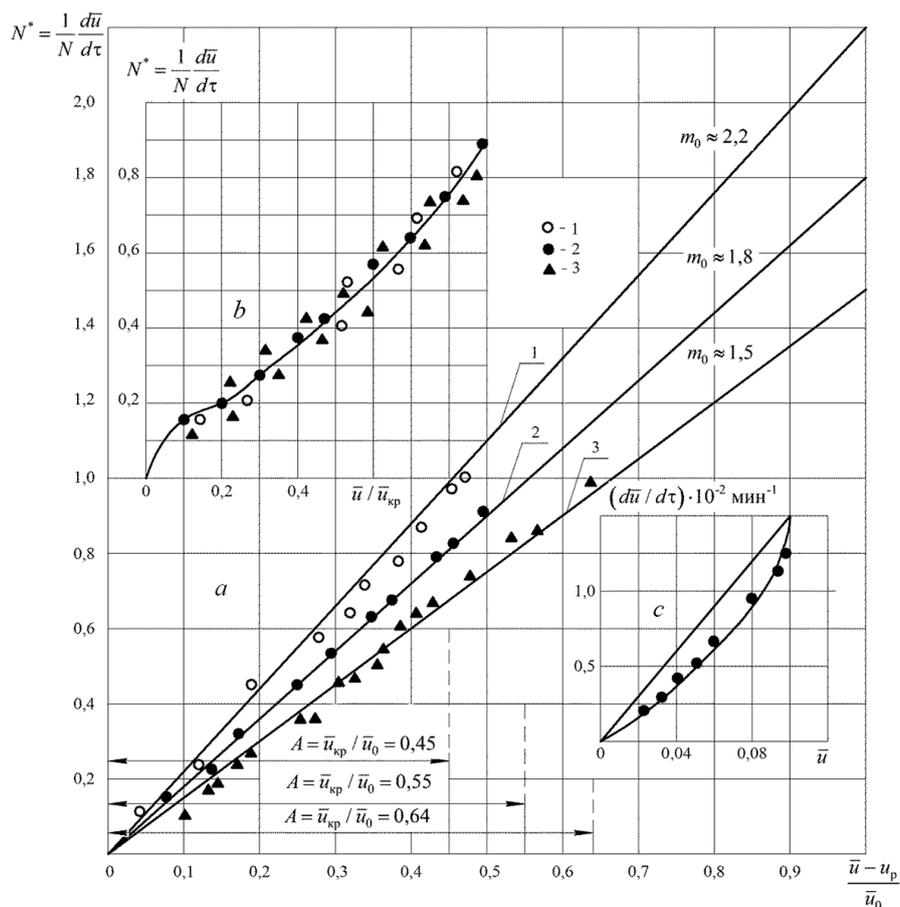
где $n = 1,3$ из уравнения (4).

Обработкой эксперимента по сушке войлока, асбеста, керамики для комплексной переменной $N^* = f\left(\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0}\right)$ получена графическая зависимость, из которой видно, что продолжение прямых, полученных для исследуемых материалов, до пересечения с вертикалью $\frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_0} = 1$ отсекают отрезки, численно равные значениям m_0 [1, 12, 13]. Равновесное влагосодержание $u_p = 0$ при $t > 90$ °С.

Используя графические зависимости (см. рисунок, a), можно найти уравнения для кривой скорости сушки [1, 12]

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \approx m_0 N \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0}\right) \quad (8)$$

и относительной скорости сушки



Зависимость относительной скорости сушки N^* от безразмерных влагосодержаний \bar{u} / \bar{u}_0 (a) и $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (b) в процессах сушки листового асбеста (1), пористой керамики (2), шерстяного войлока (3); аппроксимация кривой скорости сушки прямой для сушки пористой керамики (c) при режиме сушки: $t_c = 120$ °C, $v = 3$ м/с.

Dependence of the relative drying rate N^* on the dimensionless moisture content \bar{u} / \bar{u}_0 (a) and $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$ (b) in the drying processes of sheet asbestos (1), porous ceramics (2), wool felt (3); approximation of the straight line drying rate curve for drying porous ceramics (c) under drying mode: $t_c = 120$ °C, $v = 3$ m/s

$$N^* \approx m_0 \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right). \quad (9)$$

По оси абсцисс образуются отрезки

$$\frac{\bar{u}_{кр}}{\bar{u}_0} \approx m. \quad (10)$$

Условное критическое влагосодержание из (10) определяется соотношением [1, 12, 13]

$$\bar{u}_{кр} \approx m u_p, \quad (11)$$

где коэффициент m определяется родом влажного тела, не зависит от режима сушки и принимает следующие значения:

для керамики и пластин глины $m \approx 0,55$;

для листового асбеста $m \approx 0,45$;

для шерстяного войлока $m \approx 0,64$.

Уравнение (11) является приближенным и с погрешностью до 10 % определяет величину $\bar{u}_{кр}$, которая необходима в расчетах длительности сушки [1, 3, 6, 8, 12]. В простейшем случае для определения длительности процесса сушки применяют линейную аппроксимацию кривой скорости сушки (см. рисунок, c) при постоянном значении коэффициента сушки K (однозональный

метод А. В. Лыкова) [1, 2, 3, 6–8, 11, 12]. В соответствии с уравнением спрямляющей прямой при $K = \text{const}$ скорость сушки [1, 3, 6, 8, 11, 12] выражается уравнением

$$-\frac{d\bar{u}}{d\tau} \approx K(\bar{u} - u_p). \quad (12)$$

Интегрируя уравнение (12) [2, 3, 8, 11], получим длительность сушки во втором периоде:

$$\tau_{II} = -\frac{1}{K} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (13)$$

На основе обобщенных кривых сушки Г. К. Филоненко [9] В. В. Красников [8] получил уравнение для определения скорости сушки

$$\left| \frac{d\bar{u}}{d\tau} \right| = NN^*. \quad (14)$$

Из уравнений (12), (14) коэффициент сушки K равен:

$$K \approx -\frac{NN^*}{\bar{u} - u_p}. \quad (15)$$

Подставляя уравнение (4) в (15), получим

$$K \approx -\frac{N(\bar{u} / \bar{u}_{кр})^{1,3}}{\bar{u} - u_p}. \quad (16)$$

Следовательно, в общем случае коэффициент сушки K – величина переменная.

Для примера определим длительность сушки пористой керамики. Режим сушки $t_c = 120$ °С, $v = 3$ м/с; параметры: $N = 0,015$ мин⁻¹; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; при $\bar{u} = 0,08$ $K \approx \frac{0,015 \cdot 0,748}{0,08} \approx 0,14$ мин⁻¹; при $\bar{u} = 0,02$ $K \approx \frac{0,015 \cdot 0,123}{0,02} \approx 0,092$ мин⁻¹.

Подставляя в (13) уравнение (16), запишем

$$\tau_{II} \approx -\frac{\bar{u} - u_p}{N(\bar{u} / \bar{u}_{кр})^{1,3}} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}. \quad (17)$$

На основе графической зависимости $N^* = f(\bar{u} / \bar{u}_0)$ [1, 12] и обработки опытных данных по конвективной сушке материалов Н. С. Михеевой получено простое уравнение для расчета длительности сушки [14]

$$\tau = \tau_I + \tau_{II} \approx \frac{m_0}{N} \left[(\bar{u}_0 - u_p) - m\bar{u}_0 \right] \ln \frac{\bar{u}_0}{\bar{u} - u_p}, \quad (18)$$

где коэффициент $m \approx \bar{u}_{кр} / \bar{u}_0$.

В [12] А. В. Лыковым приводится простая формула для расчета длительности конвективной сушки

$$\tau_{II} \approx -\frac{\bar{u}_0}{m_0 N} \ln \frac{\bar{u} - u_p}{\bar{u}_{кр} - u_p}; \quad \bar{u} < \bar{u}_{кр}; \quad u_p = 0. \quad (19)$$

Подставляя выражение (11) в (19), получим

$$\tau_{II} \approx -\frac{\bar{u}_0}{m_0 N} \ln \left[\frac{1}{m} \left(\frac{\bar{u}}{\bar{u}_0} \right) \right]. \quad (20)$$

Исследование сушки тонких материалов (пористой керамики, листового асбеста, шерстяного войлока, сукна, фетра, пластин глины, технического картона, подошвенной кожи, пластин моркови) осуществлялось конвективным методом подвода тепла в сушильной установке сушильно-термической лаборатории Института тепло- и массообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. Обработка полученных опытных данных была проведена методом наименьших квадратов. В результате для относительной скорости сушки $N^* = f(N\tau_{II})$, авторами установлена зависимость [6, 15, 16]

$$N^* = -\frac{1}{N} \frac{d\bar{u}}{d\tau} = \exp(-aN\tau_{II}), \quad (21)$$

где $N\tau_{II}$ – обобщенное время сушки.

Интегрируя уравнение (21), получим время сушки во втором периоде [15, 16]:

$$\tau_{II} \approx -\frac{1}{aN} \ln[1 - a(\bar{u}_{кр} - \bar{u})]. \quad (22)$$

Коэффициент a для всех влажных материалов определяется общей зависимостью [6, 15, 16]

$$a \approx \frac{0,8}{\bar{u}_{кр}}. \quad (23)$$

Подставляя выражение (11) в (23) и (22), после простых преобразований получим

$$\tau_{II} \approx -\frac{m\bar{u}_0}{0,8N} \ln\left(1 - 0,8\left(1 - \frac{\bar{u}}{m\bar{u}_0}\right)\right). \quad (24)$$

Характерные свойства материалов. Пористая керамика относится к типичным капиллярно-пористым материалам, влага в микрокапиллярах которые в основном связана с капиллярными силами. Для получения керамики используются легкоплавкие силикатные глины, чтобы получить керамический черепок во время обжига при высоких температурах 800–900 °С. Глины относятся к капиллярно-пористым коллоидным высокодисперсным телам с пористой структурой с развитой системой микро- и макропор. Глины хорошо сорбируют из паровоздушной среды значительное количество влаги, часть которой удерживается в микропорах капиллярными силами. Войлок, асбест, картон – капиллярно-пористые волокнистые тела, относящиеся к теплоизоляционным материалам.

Основные сведения по характеристикам материалов приводятся в [20–25].

В таблице дано сравнение расчетных значений основных параметров кинетики сушки, полученных по формулам, с экспериментальными значениями. Несовпадение значений находится в области погрешности до 10 %.

Для практики сушки представляет интерес возможность приближенно оценить ее длительность без проведения эксперимента [11–13]. Для этого необходимо иметь зависимость, устанавливающую связь между влагосодержанием материала и временем сушки [1, 12]. При наличии такой связи определяется длительность сушки. Практически все экспериментальные уравнения для расчета времени сушки содержат скорость сушки в первом периоде N и критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ [1]. Критическое влагосодержание $\bar{u}_{кр}$ при известных значениях коэффициентов m и m_0 для материалов рассчитывается по формуле (11). Необходимый параметр N в первом приближении можно определить по методу Докучаева–Смирнова [17, 18] следующим способом: от начального влагосодержания \bar{u}_0 выбирается близкое к нему произвольное значение \bar{u}_1 , соответствующее времени сушки τ_1 . Находится направление прямой из образующего треугольника со сторонами $\Delta\bar{u} = \bar{u}_0 - \bar{u}_1$; $\Delta\tau = \tau_1$, которое определяет величину $N \approx \text{tg} \frac{\Delta\bar{u}}{\Delta\tau} = \text{tg} \frac{\bar{u}_0 - \bar{u}_1}{\tau_1}$. Расчеты величины N по такому способу дают несовпадение с действительным значением N в 5–8% [13, 18].

Сравнение расчетных значений скорости сушки, относительной скорости сушки, длительности сушки с экспериментальными значениями в процессах сушки листового асбеста, пористой керамики и шерстяного войлока

Comparison of calculated values of drying speed, relative drying speed, drying duration with experimental values in the drying processes of sheet asbestos, porous ceramics and wool felt

Листовой асбест. Пластина 130 × 80 × 6 мм; ρ = 770 кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 0,46$; $\bar{u}_{кр} = 0,20$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; φ = 5 %; $N \approx 0,025$ мин ⁻¹ ; $\bar{u}_{кр(φ)} \approx 0,195$										
\bar{u}	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	N^* (эксперимент)	N^* (4)	N^* (9)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (эксперимент)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (8)	τ_{II} , мин (эксперимент)	τ_{II} , мин (3)	τ_{II} , мин (17)	τ_{II} , мин (7)
0,16	0,8	0,72	0,73	0,71	0,021	0,019	2,5	2,8	2,7	2,2
0,14	0,7	0,62	0,60	0,61	0,018	0,017	3,5	3,3	3,4	3,4
0,12	0,6	0,51	0,50	0,49	0,015	0,014	5,0	5,4	5,2	5,4
0,08	0,4	0,34	0,32	0,31	0,011	0,0096	9,5	9,8	9,8	10,2
0,04	0,2	0,19	0,17	0,17	0,0053	0,0048	12,5	12,9	12,7	12,8
0,02	0,1	0,085	0,078	0,089	0,0025	0,0023	18,5	19,3	19,5	20,0
Пористая керамика. Пластина 130 × 80 × 5 мм; ρ = 1860 кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 0,20$; $\bar{u}_{кр} = 0,1$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 3$ м/с; φ = 5 %; $N = 0,015$ мин ⁻¹ ; $\bar{u}_{кр(φ)} = 0,11$										
\bar{u}	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	N^* (эксперимент)	N^* (4)	N^* (9)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (эксперимент)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (8)	τ_{II} , мин (эксперимент)	τ_{II} , мин (3)	τ_{II} , мин (17)	τ_{II} , мин (7)
0,08	0,8	0,73	0,72	0,72	0,010	0,011	2,5	2,7	2,8	2,2
0,06	0,6	0,52	0,53	0,53	0,0082	0,008	4,5	4,8	5,1	3,9
0,04	0,4	0,34	0,36	0,33	0,0048	0,005	8,5	9,1	8,9	7,9
0,02	0,2	0,18	0,17	0,18	0,0027	0,0024	12,5	12,4	12,8	12,4
Шерстяной войлок. Пластина 150 × 120 × 8 мм; ρ = 200 кг/м ³ ; $\bar{u}_0 = 1,14$; $\bar{u}_{кр} = 0,75$; $u_p = 0$. Режим сушки: $t_c = 120$ °С; $v = 5$ м/с; φ = 5 %; $N = 0,055$ мин ⁻¹ ; $\bar{u}_{кр(φ)} = 0,73$										
\bar{u}	$\bar{u} / \bar{u}_{кр}$	N^* (эксперимент)	N^* (4)	N^* (9)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (эксперимент)	$\frac{d\bar{u}}{d\tau}$, мин ⁻¹ (8)	τ_{II} , мин (эксперимент)	τ_{II} , мин (3)	τ_{II} , мин (17)	τ_{II} , мин (7)
0,6	0,80	0,77	0,80	0,76	0,049	0,051	3,5	3,8	3,7	3,9
0,5	0,67	0,62	0,65	0,59	0,038	0,039	6,5	5,9	5,7	6,7
0,4	0,53	0,48	0,52	0,45	0,027	0,025	9,5	9,1	8,9	10,2
0,3	0,40	0,38	0,37	0,32	0,018	0,019	13,5	12,8	13,5	14,2
0,2	0,27	0,24	0,24	0,19	0,011	0,0096	18,5	18,6	17,8	19,3

Примечание: φ – относительная влажность воздуха; $\bar{u}_{кр(φ)}$ – критическое влагосодержание, определенное по формуле (11).

Note: φ is the relative humidity of the air; $\bar{u}_{кр(φ)}$ is the critical moisture content determined by the formula (11).

Заключение. Рассмотренный способ расчета кинетики сушки, основанный на относительной скорости сушки N^* и относительных влагосодержаниях \bar{u} / \bar{u}_0 и $\bar{u} / \bar{u}_{кр}$, позволяет получить уравнения для расчета длительности сушки, критического влагосодержания $\bar{u}_{кр}$, которое зависит от режимных параметров сушки. Обработка опытных данных для зависимостей $N^* = \bar{u} / \bar{u}_0$ и $N^* = \bar{u} / \bar{u}_{кр}$ в процессе сушки керамики, асбеста, войлока дана впервые. Проверка достоверности уравнений при сопоставлении с экспериментальными данными дает разброс значений в области погрешности до 10 %.

Формулы для расчета длительности сушки, полученные без построения кривой скорости сушки, позволяют значительно ускорить обработку опытных данных. Метод обработки опытных данных на основе относительной скорости сушки может быть применен и для других материалов.

Список использованных источников

1. Лыков, А. В. Теория сушки / А. В. Лыков. – М.: Энергия, 1968 – 472 с.
2. Акулич, П. В. Расчеты сушильных и теплообменных установок / П. В. Акулич. – Минск: Беларус. навука, 2010. – 443 с.
3. Рудобашта, С. П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С. П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.
4. Сажин, Б. С. Научные основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Наука, 1997. – 447 с.
5. Васильев, В. Н. Технология сушки. Основы тепло- и массопереноса / В. Н. Васильев, В. Е. Куцакова, С. В. Фролов. – СПб.: ГИОРД, 2013. – 224 с.
6. Куц, П. С. Некоторые закономерности теплообмена и приближенные методы расчета кинематики процесса сушки влажных материалов / П. С. Куц, А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 1977. – Т. 32, № 5. – С. 1007–1014.
7. Ольшанский, А. И. Исследование кинетики теплообмена при термической обработке и сушке тонких влажных теплоизоляционных материалов / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 1. – С. 66–79. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>
8. Красников, В. В. Кондуктивная сушка / В. В. Красников. – М.: Энергия, 1973. – 288 с.
9. Филоненко, Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1952. – 264 с.
10. Ольшанский, А. И. Исследование теплообмена в процессе сушки влажных материалов по экспериментальным данным теплообмена / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2014. – Т. 87, № 4. – С. 887–897.
11. Игонин, В. Н. Уравнения кинетики теплообмена при сушке / В. Н. Игонин, М. В. Сотников // Аграрная наука и образование на современном этапе развития: опыт, проблемы и пути их решения: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф., 7–8 февр. 2017 г. – Ульяновск: УГСХА им. П. А. Столыпина, 2017. – Ч. 1. – С. 119–123.
12. Лыков, А. В. Тепло- и массообмен в процессах сушки / А. В. Лыков. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 462 с.
13. Ольшанский, А. И. Исследование тепло- и массообмена в процессе конвективной термообработки и сушки теплоизоляционных материалов и приближенное уравнение кривой сушки / А. И. Ольшанский, А. Н. Голубев // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2023. – Т. 66, № 5. – С. 461–477. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477>
14. Кавказов, Ю. Л. Тепло- и массообмен в технологии кожи и обуви / Ю. Л. Кавказов. – М.: Легкая индустрия, 1973. – 272 с.
15. Ольшанский, А. И. Некоторые закономерности кинетики сушки пищевых продуктов / А. И. Ольшанский, П. С. Куц // Изв. вузов. Пищевая технология. – 1977. – № 5. – С. 97–101.
16. Ольшанский, А. И. Исследование сушки тонких материалов с использованием обобщенных комплексных переменных / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журнал. – 2016. – Т. 89, № 4. – С. 884–894.
17. Смирнов, М. С. Уравнение кривой сушки / М. С. Смирнов // Изв. вузов. Технология легкой промышленности. – 1961. – № 3. – С. 77–82.
18. Ольшанский, А. И. Исследование процесса сушки пористой керамики методом Докучаева–Смирнова / А. И. Ольшанский // Инженер.-физ. журн. – 2013. – Т. 86, № 1. – С. 77–85.
19. Kudra, T. *Advanced Drying Technologies* / T. Kudra, A. S. Mujumdar. – Taylor & Francis, Inc., Bosa Roca, 2009. – 446 p. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>
20. García del Valle, J. Analytical solution for the coupled heat and mass transfer formulation of one-dimensional drying kinetics / J. García del Valle, J. Sierra Pallares // J. Food Eng. – 2018. – Vol. 230. – P. 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.029>
21. Беркман, А. С. Пористая проницаемая керамика / А. С. Беркман, И. Г. Мельникова. – Л.: Стройиздат, 1969. – 142 с.
22. Белополюский, М. С. Изменение структуры коллоидного капиллярно-пористого тела (глины) в процессе сушки / М. С. Белополюский // Инженер.-физ. журн. – 1961. – Т. 4, № 4. – С. 49–61.
23. Франчук, А. У. Таблицы теплотехнических показателей строительных материалов / А. У. Франчук. – М.: НИИ строительной физики, 1969. – 142 с.
24. Блази, В. Справочник проектировщика. Строительная физика / В. Блази. – М.: Техносфера, 2005. – 535 с.
25. Колесников, П. А. Теплозащитные свойства одежды / П. А. Колесников. – М.: Легкая индустрия, 1965. – 345 с.

References

1. Lykov A. V. *Theory of Drying*. Moscow, Energiya Publ., 1968. 472 p. (in Russian).
2. Akulich P. V. *Calculations of Drying and Heat Exchange Installations*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ., 2010. 443 p. (in Russian).
3. Rudobashta S. P. *Mass Transfer in Systems with a Solid Phase*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 248 p. (in Russian).
4. Sazhin B. S. *The Science of Drying Techniques*. Moscow, Nauka Publ., 1997. 447 p. (in Russian).
5. Vasil'ev V. N., Kutsakova V. E., Frolov S. V. *Drying Technology. Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. St. Petersburg, GIOR Publ., 2013. 224 p. (in Russian).
6. Kutz P. S., Ol'shansky A. I. Some Features of Heat and Moisture Transfer and Approximate Methods of Calculating the Drying Kinetics of Moist Materials. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1977, vol. 32, no. 6, pp. 650–656. <https://doi.org/10.1007/bf00862568>

7. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. Investigation of the Kinetics of Heat and Moisture Exchange during Heat Treatment and Drying of Thin Wet Thermal Insulation Materials. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2023, vol. 66, no. 1, pp. 66–79 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-1-66-79>
8. Krasnikov V. V. *Conductive Drying*. Moscow, Energia Publ., 1973. 288 p. (in Russian).
9. Filonenko G. K., Lebedev P. D. *Drying Plants*. Moscow, Leningrad, Gosenergoizdat Publ., 1952. 264 p. (in Russian).
10. Ol'shansky A. I. Study of Heat Transfer During the Drying Process of Wet Materials Based on Experimental Data on Moisture Exchange. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2014, vol. 87, no. 4, pp. 917–928. <http://doi.org/10.1007/s10891-014-1089-y>
11. Igonin V. N., Sotnikov V. N. Equations of moisture exchange kinetics during drying. *Agrarnaya nauka i obrazovanie na sovremennom etape razvitiya: opyt, problemy i puti ikh resheniya: materialy VIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, 7–8 fevralya 2017 g.* [Agricultural science and education at the present stage of development: experience, problems and ways to solve them: Materials of the VIII International Scientific and Practical Conference. February 7–8, 2017]. Ulyanovsk: UGSHA named after P. A. Stolypin, 2017, Part I, pp. 119–123 (in Russian).
12. Lykov A. V. *Heat and Mass Transfer in Drying Processes*. Moscow, Gosenergoizdat Publ., 1956. 462 p. (in Russian).
13. Ol'shanskii A. I., Golubev A. N. Investigation of Heat and Mass Transfer in the Process of Convective Heat Treatment and Drying of Thermal Insulation Materials and Approximate Equation of the Drying Curve. *Energetika. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii i energeticheskikh ob'edinenii SNG = Energetika. Proceedings of CIS Higher Education Institutions and Power Engineering Associations*, 2023, vol. 66, no. 5, pp. 461–477 (in Russian). <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-461-477>
14. Kavkazov Yu. L. *Heat and Mass Transfer in Leather and Footwear Technology*. Moscow, Legkaya promyshlennost' Publ., 1973. 272 p. (in Russian).
15. Ol'shansky A. I., Kutz P. S. Some patterns of food drying kinetics. *Izvestiya vuzov. Pishchevaya tekhnologiya = Izvestiya vuzov. Food Technology*, 1977, vol. 5, pp. 97–101 (in Russian).
16. Ol'shansky A. I. Investigation of the Drying of Thin Materials with the use of Generalized Complex Variables. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2016, vol. 89, no. 4, pp. 886–895. <http://doi.org/10.1007/s10891-016-1450-4>
17. Smirnov M. S. Drying Curve Equation. *Izvestiya vuzov. Tekhnologiya legkoj promyshlennosti = News of Higher Educational Institutions. Technology of Light Industry*, 1961, vol. 3, pp. 77–82 (in Russian).
18. Ol'shansky A. I. Investigation of the processes of drying of porous ceramics by the Dokuchaev–Smirnov method. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 2013, vol. 86, no. 1, pp. 80–87. <https://doi.org/10.1007/s10891-013-0807-1>
19. Kudra T., Mujumdar A. S. *Advanced Drying Technologies*. Taylor & Francis, Inc., Bosa Roca, 2009. 446 p. <https://doi.org/10.1201/9781420073898>
20. García del Valle J., Sierra Pallares J. Analytical solution for the coupled heat and mass transfer formulation of one-dimensional drying kinetics. *Journal of Food Engineering*, 2018, vol. 230, pp. 99–113. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2018.02.029>
21. Berkman A. S. *Porous Permeable Ceramics*. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1969. 142 p. (in Russian).
22. Belopolsky M. S. The Change in the Structure of a Colloidal Capillary Porous Substance (Clay) during the Drying Process. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 1961, vol. 4, no. 4, pp. 49–54.
23. Franchuk A. U. *Tables of Thermal Technical Indicators of Building Materials*. Moscow, Research Institute of Construction Physics Publ., 1969. 142 p. (in Russian).
24. Blasi V. *Designer's Handbook. Construction Physics*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2005. 535 p. (in Russian).
25. Kolesnikov P. A. *Heat-Protective Properties of Clothing*. Moscow, Legkaya industriya Publ., 1965. 345 p. (in Russian).

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

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ
RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-215-224>
УДК 537.87



Оригинальная статья

О. В. Бойправ*, Е. С. Белоусова, В. С. Мокеров

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

**ХАРАКТЕРИСТИКИ ОТРАЖЕНИЯ, ПЕРЕДАЧИ И ПОГЛОЩЕНИЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УГЛЕСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ,
ПРОПИТАННЫХ ВОДНЫМИ РАСТВОРАМИ ХЛОРИДОВ**

Аннотация. Представлены установленные экспериментальным путем закономерности изменения характеристик отражения, передачи и поглощения электромагнитного излучения в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц материалов. Эти материалы содержали порошкообразный активированный березовый уголь, пропитанный водными растворами хлоридов (хлорид кальция, хлорид магния и хлорид натрия). С использованием установленных закономерностей определено, что материалы на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, являются радиопоглощающими в случае, если они взаимодействуют с электромагнитным излучением в диапазонах частот 3,5–4,5 и 5,5–17,0 ГГц. В свою очередь материалы на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водными растворами хлоридов магния и натрия, являются радиопоглощающими в случае, если они взаимодействуют с электромагнитным излучением в диапазонах частот 2,0–17,0 и 2,0–7,5 ГГц (раствор хлорида магния), 10,0–17,0 ГГц (раствор хлорида натрия). Значения коэффициента поглощения электромагнитного излучения исследованных материалов достигают 0,95. Исследуемые материалы представляются перспективными для изготовления перегородок, предназначенных для экранирования секторов помещений, где располагаются приборы электронной техники, чувствительные к воздействию электромагнитных помех.

Ключевые слова: коэффициент отражения, коэффициент передачи, коэффициент поглощения, поглотитель электромагнитного излучения, порошкообразный активированный березовый уголь, хлорид щелочного металла, хлорид щелочноземельного металла

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Бойправ Ольга Владимировна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0002-9987-8109>. E-mail: smu@bsuir.by; *Белоусова Елена Сергеевна* – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры защиты информации, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники. <https://orcid.org/0000-0001-9834-6074>. E-mail: belousova@bsuir.by; *Мокеров Вячеслав Сергеевич* – студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники. E-mail: vyacheslav.mokerov@mail.ru

Вклад авторов: *Бойправ Ольга Владимировна* – определение целей и задач исследования, расчет значений коэффициента поглощения электромагнитного излучения экспериментальных образцов, интерпретация результатов расчета, написание текста рукописи; *Белоусова Елена Сергеевна* – изготовление экспериментальных образцов, анализ результатов измерения значений коэффициентов отражения и передачи экспериментальных образцов; *Мокеров Вячеслав Сергеевич* – изготовление экспериментальных образцов, измерение значений коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения экспериментальных образцов.

Для цитирования: Бойправ, О. В. Характеристики отражения, передачи и поглощения электромагнитного излучения углесодержащих материалов, пропитанных водными растворами хлоридов / О. В. Бойправ, Е. С. Белоусова, В. С. Мокеров // Вест. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 215–224. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-215-224>

Поступила в редакцию: 04.10.2023

Доработанный вариант: 12.03.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

© Бойправ О. В., Белоусова Е. С., Мокеров В. С., 2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

Original article

Olga V. Boiprav*, Elena S. Belousova, Vyacheslav S. Mokerov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
19, P. Brovka Str., 220072, Minsk, Republic of Belarus**ELECTROMAGNETIC RADIATION REFLECTION, TRANSMISSION
AND ABSORPTION CHARACTERISTICS OF CHARCOAL-CONTAINING MATERIALS IMPREGNATED
WITH CHLORIDES AQUEOUS SOLUTIONS**

Abstract. The experimentally established regularities of changes in electromagnetic radiation reflection, transmission and absorption characteristics in the frequency range of 2.0–17.0 GHz of materials are presented. These materials contained powdered activated birch charcoal impregnated with chlorides aqueous solutions (calcium chloride, magnesium chloride and sodium chloride). Using the established regularities, it was determined that materials based on powdered activated birch charcoal impregnated with calcium chloride aqueous solution are radioabsorbing if they interact with electromagnetic radiation in the frequency ranges of 3.5–4.5 and 5.5–17.0 GHz. In turn, materials based on powdered activated birch charcoal impregnated with magnesium and sodium chlorides aqueous solutions are radioabsorbing if they interact with electromagnetic radiation in the frequency ranges of 2.0–17.0 and 2.0–7.5 GHz (magnesium chloride solution), 10.0–17.0 GHz (sodium chloride solution). Electromagnetic radiation absorption coefficient values of the studied materials reach 0.95. These materials seem promising for the manufacture of partitions to shield sectors of premises where electronic devices sensitive to electromagnetic interference are located.

Keywords: reflection coefficient, transmission coefficient, absorption coefficient, electromagnetic radiation absorber, powdered activated birch carbon, alkali metal chloride, alkaline earth metal chloride

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

Information about the authors: *Olga V. Boiprav* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0002-9987-8109>. E-mail: smu@bsuir.by; *Elena S. Belousova* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Information Protection Department at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. <https://orcid.org/0000-0001-9834-6074>. E-mail: belousova@bsuir.by; *Vyacheslav S. Mokerov* – Student at Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics. E-mail: vyacheslav.mokerov@mail.ru

Contribution of the authors: *Olga V. Boiprav* – determination of the study aim and objectives, calculation of electromagnetic radiation absorption coefficient values of the experimental samples, calculation results interpretation, writing the text of the manuscript; *Elena S. Belousova* – experimental samples production, analysis of the measurement results of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples; *Vyacheslav S. Mokerov* – experimental samples production, measurement of electromagnetic radiation reflection and transmission coefficients values of the experimental samples.

For citation: Boiprav O. V., Belousova E. S., Mokerov V. S. Electromagnetic radiation reflection, transmission and absorption characteristics of charcoal-containing materials impregnated with chlorides aqueous solutions; *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. 3, pp. 215–224 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-215-224>

Received: 04.10.2023

Modified: 12.03.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. В настоящее время в связи с широким использованием приборов электронной техники остро встает проблема защиты от электромагнитного излучения (ЭМИ). Для решения этой проблемы исследователи предлагают использовать различные материалы. Так, в [1–4] экспериментально обоснована перспективность применения порошкообразного угля при изготовлении поглотителей ЭМИ СВЧ-диапазона.

Ранее авторами была представлена технология изготовления гибких поглотителей ЭМИ на основе порошкообразных древесных углей, пропитанных водным раствором хлорида кальция [5].

Цель настоящей работы – установление закономерностей изменения характеристик отражения, передачи и поглощения ЭМИ материалов на основе порошкообразного угля, пропитанного водными растворами хлоридов, в зависимости от типа последних; усовершенствование на основе установленных закономерностей технологии, представленной в [5].

Для достижения поставленной цели были обоснованы основные и вспомогательные компоненты для изготовления экспериментальных образцов материалов на основе порошкообразного угля, пропитанного водными растворами хлоридов, и изготовлены экспериментальные образцы таких материалов. Авторами установлены изменения значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ изготовленных экспериментальных образцов материалов; рассчитаны значения

коэффициента поглощения ЭМИ изготовленных экспериментальных образцов материалов. В рамках исследования выполнена оценка значений удельной электропроводности порошкообразного угля, использованных для изготовления экспериментальных образцов; а также составлены рекомендации, касающиеся порядка использования полученных результатов исследования в рамках технологий изготовления углесодержащих поглотителей ЭМИ.

Методика проведения исследования. Для изготовления экспериментальных образцов материалов в качестве основных были выбраны следующие компоненты:

- порошкообразный активированный березовый уголь с размером частиц 0,3–0,5 см;
- водные растворы хлоридов щелочноземельных и щелочных металлов (кальция, магния и натрия).

Выбор порошкообразного активированного березового угля обусловлен следующими причинами:

1) данный тип угля характеризуется более низкой плотностью по сравнению с другими порошкообразными углями, что обуславливает возможность получения на его основе материалов, характеризующихся сравнительно невысокой массой на единицу площади [6, с. 27–29];

2) значения коэффициентов отражения и передачи ЭМИ порошкообразного активированного березового угля ниже, чем значения аналогичных параметров, характерных для других порошкообразных углей [6, с. 37–45].

Выбор используемых в эксперименте водных растворов хлоридов щелочноземельных и щелочных металлов обусловлен их высокой электропроводностью, а также доступностью [7].

В качестве вспомогательного компонента для изготовления экспериментальных образцов авторы выбрали самоклеящуюся полимерную пленку. На ее основе были изготовлены матрицы, которые предназначались для фиксирования частиц порошкообразного активированного березового угля. Преимущество таких матриц по сравнению с матрицами на основе связующих веществ (клей, силикон, гипс и т. п.) состоит в том, что при их использовании в ходе изготовления поглотителей ЭМИ отсутствуют временные затраты, обусловленные процессом их затвердевания.

Каждая из матриц для фиксирования частиц порошкообразного активированного березового угля формировалась путем соединения двух одинаковых фрагментов прямоугольной формы из самоклеящейся полимерной пленки.

Соединение фрагментов выполнялось по трем краям периметра, при этом сами фрагменты были ориентированы лицевой стороной наружу (то есть стороной, на которую не нанесен клеевой слой). Края периметра указанных фрагментов, по которым последние не были соединены друг с другом, образовывали отверстие. Через это отверстие выполнялось заполнение матриц частицами порошкообразного активированного угля.

Было изготовлено восемь групп экспериментальных образцов. В табл. 1 представлены характеристики образцов каждой из групп. Толщина каждого из образцов составляла $0,3 \pm 0,1$ см.

Образцы № 1, 2 являлись, по сути, базовыми. Получение результатов оценки их значений коэффициентов отражения, передачи и поглощения ЭМИ было нужно для того, чтобы установить, как влияет пропитывание порошкообразного активированного березового угля водными растворами хлоридов кальция, магния и натрия на перечисленные значения, характерные для поглотителей ЭМИ на основе такого угля.

Образцы № 3–8, как видно из табл. 1, были изготовлены на основе порошкообразного активированного березового угля, частицы которого пропитаны до насыщения водными растворами хлорида кальция, магния или натрия. Концентрация этих растворов составляла $35,0 \pm 1,0$ мас.%, что соответствует предельной растворимости хлорида натрия в воде [8].

Между тем образцы № 2, 4, 6 и 8 (см. табл. 1) отличались от образцов № 1, 3, 5 и 7 наличием внутреннего слоя, изготовленного на основе фольгированной полимерной пленки. Результаты определения значений коэффициентов отражения и поглощения ЭМИ образцов № 2, 4, 6 и 8 были необходимы для оценки целесообразности использования углесодержащих материалов, которые стали объектом исследования, а также для снижения энергии пассивных электромагнитных помех в СВЧ-диапазоне (то есть помех, являющихся следствием отражения ЭМИ от металлических конструкций) [9].

Т а б л и ц а 1. Характеристики изготовленных экспериментальных образцов
Table 1. Characteristics of manufactured experimental samples

Условное обозначение групп образцов	Основные компоненты образцов	Количество и состав слоев образцов
Образцы № 1	Порошкообразный активированный березовый уголь	Один слой на основе частиц угля, зафиксированных в матрице
Образцы № 2		Два слоя: наружный – на основе частиц угля, зафиксированных в матрице; внутренний – на основе фольгированной полимерной пленки
Образцы № 3	Порошкообразный активированный березовый уголь, водный раствор хлорида кальция	Один слой на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция и зафиксированных в матрице
Образцы № 4		Два слоя: наружный – на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция и зафиксированных в матрице; внутренний – на основе фольгированной полимерной пленки
Образцы № 5	Порошкообразный активированный березовый уголь, водный раствор хлорида магния	Один слой на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида магния и зафиксированных в матрице
Образцы № 6		Два слоя: наружный – на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида магния и зафиксированных в матрице; внутренний – на основе фольгированной полимерной пленки
Образцы № 7	Порошкообразный активированный березовый уголь, водный раствор хлорида натрия	Один слой на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида натрия и зафиксированных в матрице
Образцы № 8		Два слоя: наружный – на основе частиц угля, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида натрия и зафиксированных в матрице; внутренний – на основе фольгированной полимерной пленки

Значения коэффициентов отражения (S_{11} , дБ) и передачи (S_{21} , дБ) ЭМИ образцов измерялись диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц в соответствии с методикой и алгоритмом, представленными в [6, с. 32–34; 10].

Для проведения измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов использовались система, в состав которой вошли: панорамный измеритель коэффициентов отражения и передачи SNA 0.01–18 (MWM Lab, г. Минск, Республика Беларусь); персональный компьютер; специальное программное обеспечение; две рупорные антенны П6-23М.

Обработка результатов измерений значений коэффициентов отражения и передачи ЭМИ образцов проводилась в соответствии с алгоритмом, представленным в [10].

Расчет значений коэффициента поглощения ЭМИ образцов (A) выполнялся на основе формулы

$$A = 1 - 10^{\frac{S_{11}}{10}} - 10^{\frac{S_{21}}{10}}, \text{ отн. ед.}$$

Значения удельной электропроводности порошкообразных углей, использованных для изготовления экспериментальных образцов, оценивались согласно методике, представленной в [5]. При этом был использован измеритель иммитанса E7-20 (ОАО «МНИПИ», г. Минск, Республика Беларусь).

Результаты и их обсуждение. На рис. 1 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7.

Видно, что величина указанного параметра, характерного для образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, изменяется в пределах от –1,0 до –10,0 дБ, а для образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, магния или натрия, – в пределах от –2,0 до –12,0 дБ, от –3,5 до –10,0 дБ или от –5,0 до –13,0 дБ соответственно. Величины рассматриваемого параметра, характерные для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, магния или натрия, в диапазоне частот 2,0–12,0 ГГц ниже в среднем на 2,0 дБ, чем для образцов на основе непропитанного порошкообразного активированного березового угля. В диапазоне частот 12,0–17,0 ГГц величины рассматриваемого параметра, характерные для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, в среднем сопоставимы с величинами рассматриваемого параметра,

характерными для образцов на основе угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция, и ниже в среднем на 4,0 дБ или 2,0 дБ, чем для образцов на основе угля, пропитанного водным раствором хлорида магния или натрия соответственно.

Более низкие значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–12,0 ГГц образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, магния или натрия, по сравнению с образцами на основе порошкообразного активированного березового угля без пропитки могут быть обусловлены тем, что частицы угля, входящие в состав пропитанных образцов, обеспечивают в большей степени рассеяние взаимодействующих с ними электромагнитных волн, чем частицы угля, входящие в состав образцов без пропитки, ввиду того, что содержат влагу [11–13].

Значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 12,0–17,0 ГГц на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, выше, чем образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и образцов на основе непропитанного порошкообразного активированного березового угля в связи со следующими особенностями:

1) размер частиц порошкообразного березового угля сопоставим с длинами волн в диапазоне частот 12,0–17,0 ГГц, в связи с чем эти волны в большей степени отражаются частицами угля, чем рассеиваются;

2) как установлено по результатам оценки, выполненной в соответствии с представленной в [5] методикой, удельная электропроводность порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, составляет 7,5 См/м, порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния, – 9,0 См/м, а порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида натрия, – 10,0 См/м, что выше, чем удельная электропроводность порошкообразного активированного березового угля без пропитки, которая составляет 0,5 См/м;

3) уровень потерь энергии ЭМИ в электропроводящем материале, обусловленных явлением отражения этого излучения от поверхности материала, описывается выражением $39,5 + 10 \lg \frac{\sigma}{2\pi f \mu}$ [14], где σ – значение удельной электропроводности материала, f – частота ЭМИ, μ – значение относительной магнитной проницаемости материала. То есть чем выше значение удельной электропроводности материала, тем выше его значение коэффициента отражения ЭМИ.

На рис. 2 представлены частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7.

Исходя из данных рисунка можно сделать заключение, что величина указанного параметра, характерного для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, изменяется в пределах от –0,5 до –6,0 дБ, что в среднем больше:

на 1,0 дБ, чем для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида кальция;

на 4,0 дБ, чем для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида магния;

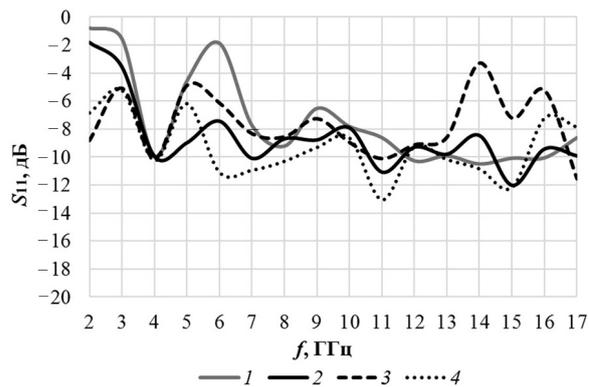


Рис. 1. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)
 Fig. 1. Frequency dependences of the electromagnetic radiation reflection coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 1, 3, 5 and 7 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

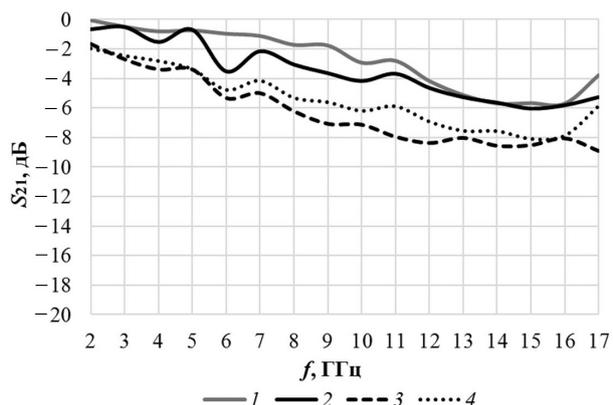


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 2. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation transmission coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 1, 3, 5 and 7 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

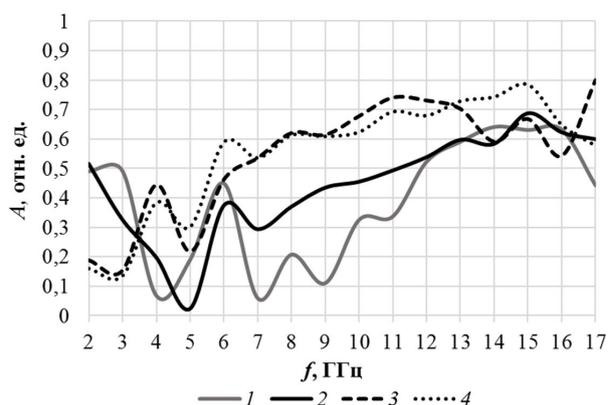


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 3. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation absorption coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 1, 3, 5 and 7 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

на 2,0 дБ, чем для образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного водным раствором хлорида натрия.

Обозначенные различия между значениями коэффициента передачи ЭМИ образцов на основе порошкообразного активированного березового угля без пропитки и пропитанного до насыщения водными растворами хлоридов обусловлены тем, что значение удельной электропроводности порошкообразного активированного березового угля, использованного для изготовления первых из указанных образцов, ниже, чем значения удельной электропроводности порошкообразных активированных березовых углей, использованных для изготовления вторых из указанных образцов.

Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 1, 3, 5 и 7 показаны на рис. 3.

Как видно на рис. 3, образцы № 5 и 7 характеризуются более высокими значениями коэффициента поглощения ЭМИ, чем образцы № 1 и 3, что обусловлено следующими особенностями:

во-первых, как уже было отмечено, значения удельной электропроводности порошкообразных активированных березовых углей, пропитанных до насыщения водными растворами хлоридов магния и натрия (то есть углей, использованных для изготовления образцов № 5 и 7 соответственно), превышают значения удельной электропроводности порошкообразного активированного березового угля без пропитки и порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция (то есть углей, использованных для изготовления образцов № 1 и 3 соответственно);

во-вторых, уровень потерь энергии ЭМИ в электропроводящем материале, обусловленных явлением поглощения этого излучения материалом, описывается выражением $8,7 \cdot d \cdot \sqrt{f \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \mu}$ [14], где d – толщина материала. То есть чем выше значение удельной электропроводности материала, тем выше значение его коэффициента поглощения ЭМИ.

Образцы № 5 и 7 по сравнению с образцами № 1 и 3 являются радиопоглощающими материалами [15]. Их эффективная полоса поглощения ЭМИ – от 6,0 до 17,0 ГГц. Значение ширины их эффективной полосы поглощения в абсолютных единицах составляет 9,0 ГГц, значение ширины их эффективной полосы поглощения в относительных единицах – 67,0 %. Исходя из этого можно заключить, что образцы № 5 и 7 являются широкополосными радиопоглощающими материалами.

На рис. 4 представлены частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 2, 4, 6 и 8.

Видно, что значения коэффициента отражения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов, изготовленных на основе непропитанного порошкообразного активированного березового угля и содержащих фольгированную полимерную пленку, изменяются в пределах от –0,5 до –9,0 дБ; образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и содержащих фольгированную полимерную пленку, – от –0,5 до –13,0 дБ; образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния, и содержащих фольгированную полимерную пленку, – от –4,0 до –16,0 дБ; образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида натрия, и содержащих фольгированную полимерную пленку, – от –2,0 до –12,0 дБ.

В свою очередь значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–6,0 ГГц образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, и содержащих фольгированную полимерную пленку, ниже соответственно в среднем на 4,0 дБ или 3,0 дБ, чем значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 2,0–6,0 ГГц образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и содержащих фольгированную полимерную пленку. Значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 6,0–17,0 ГГц образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и содержащих фольгированную полимерную пленку, ниже в среднем на 4,0 дБ, чем значения коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне частот 6,0–17,0 ГГц образцов на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, и содержащих фольгированную полимерную пленку.

Обозначенные особенности обусловлены тем, что в диапазоне частот 2,0–6,0 ГГц разность фаз электромагнитных волн, отражаемых от поверхности наружного слоя образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, и электромагнитных волн, отражаемых от поверхности внутреннего слоя этих образцов (то есть от поверхности фольгированной полимерной пленки), превышает разность фаз электромагнитных волн, отражаемых от поверхности наружного слоя образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и электромагнитных волн, отражаемых от поверхности внутреннего слоя этих образцов. В диапазоне же частот 6,0–17,0 ГГц наблюдается обратное соотношение между указанными разностями фаз [16, 17].

Как видно из рис. 4, наибольшая разность фаз электромагнитных волн, отражаемых от поверхности наружного слоя образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния или натрия, и электромагнитных волн, отражаемых от поверхности внутреннего слоя этих образцов, наблюдается на частоте 4,0 ГГц. При этом наибольшая разность фаз электромагнитных волн, отражаемых от поверхности наружного слоя образцов, изготовленных на основе порошкообразного активированного березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида кальция, и электромагнитных волн, отражаемых от поверхности внутреннего слоя этих образцов, отмечается на частоте 15,0 ГГц.

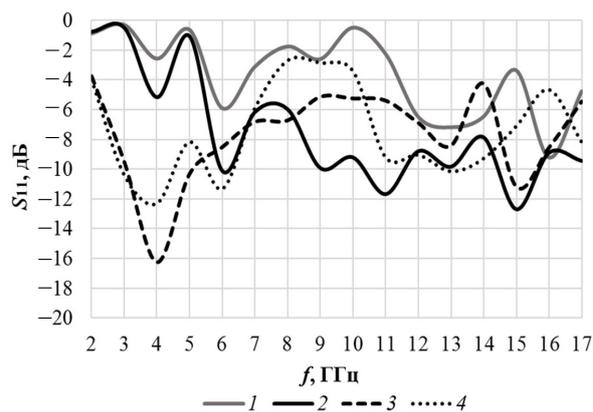


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента отражения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 2, 4, 6 и 8 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 4. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation reflection coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 2, 4, 6 and 8 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

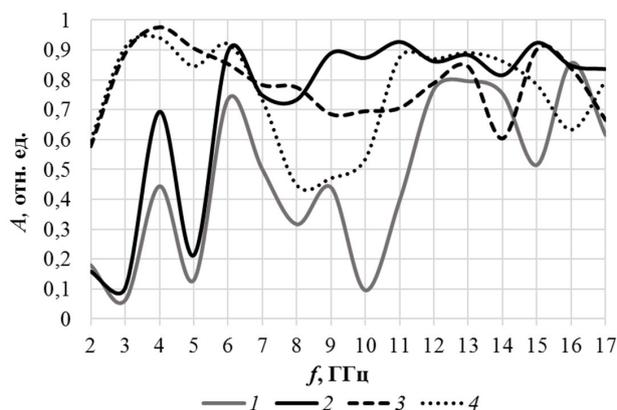


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента поглощения электромагнитного излучения в диапазоне 2,0–17,0 ГГц образцов № 2, 4, 6 и 8 (графики 1, 2, 3 и 4 соответственно)

Fig. 5. Frequency dependencies of the electromagnetic radiation absorption coefficient in the range of 2.0–17.0 GHz of samples No. 2, 4, 6 and 8 (graphs 1, 2, 3 and 4, respectively)

березового угля, пропитанного до насыщения водным раствором хлорида магния, и содержащие фольгированную полимерную пленку. Это обусловлено большим значением удельной электропроводности данного порошкообразного материала по сравнению с удельной электропроводностью порошкообразных активированных березовых углей, пропитанных до насыщения водным раствором хлорида кальция или натрия.

Т а б л и ц а 2. Характеристики образцов № 2, 4, 6 и 8

Table 2. Characteristics of samples No. 2, 4, 6 and 8

Условное обозначение образца	Эффективная(-ые) полоса(-ы) поглощения ЭМИ	Ширина эффективной(-ых) полосы (полос) поглощения ЭМИ, ГГц	Ширина эффективной(-ых) полосы (полос) поглощения ЭМИ, %	Диапазон(-ы) значений коэффициента поглощения ЭМИ
Образец № 2	5,5–7,0 ГГц	1,5	24,0	0,5–0,75
	11,5–17,0 ГГц	5,5	39,0	0,5–0,8
Образец № 4	3,5–4,5 ГГц	1,0	25,0	0,5–0,7
	5,5–17,0 ГГц	11,5	98,0	0,5–0,9
Образец № 6	2,0–17,0 ГГц	15,0	158,0	0,6–0,98
Образец № 8	2,0–7,5 ГГц	5,5	116,0	0,5–0,95
	10,0–17,0 ГГц	7,0	50,0	0,5–0,9

Заключение. На основе полученных результатов исследования была усовершенствована технология изготовления гибких поглотителей ЭМИ на основе порошкообразных древесных углей, представленная в [5]. В частности, был включен этап, связанный с выбором типа раствора хлорида, которым нужно пропитать порошкообразный активированный березовый уголь для того, чтобы получить на основе последнего материал, характеризующийся требуемой эффективной полосой поглощения ЭМИ. Описание указанного этапа включает в себя данные, представленные в табл. 2.

Усовершенствованная технология изготовления гибких поглотителей ЭМИ на основе порошкообразных древесных углей может быть использована для решения практических задач, связанных с улучшением условий эксплуатации приборов электронной техники: например, для создания или совершенствования экранированных помещений и выделения в помещениях экранированных зон.

Установлено, что значения коэффициента передачи ЭМИ в диапазоне частот 2,0–17,0 ГГц образцов № 2, 4, 6 и 8 несущественно зависят от состава последних и изменяются в пределах от –25,0 до –40,0 дБ. Частотные зависимости коэффициента поглощения ЭМИ в диапазоне 2,0–17,0 ГГц перечисленных образцов представлены на рис. 5.

Из рис. 5 следует, что образцы № 2, 4, 6 и 8 являются радиопоглощающими материалами. В табл. 2 представлены характеристики таких образцов.

Исходя из данных табл. 2 можно сделать заключение, что исследованные образцы, содержащие фольгированную полимерную пленку, являются по сути широкополосными радиопоглощающими материалами. Наибольшей шириной полосы поглощения и наибольшими значениями коэффициента поглощения ЭМИ характеризуются образцы, изготовленные на основе порошкообразного активированного

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Activated carbon and palm oil fuel ash as microwave absorbers for microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell waste / S. Chuayjumnong [et al.] // *RSC Adv.* – 2020. – Iss. 53. – P. 32058–32068. <https://doi.org/10.1039/D0RA04966B>
2. Activated carbon derived from mango leaves as an enhanced microwave absorbing material / P. Negi [et al.] // *Sustain. Mater. Technol.* – 2021. – Vol. 27. – Art. ID e00244. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00244>
3. Boiprav, O. V. Flexible microwave absorbers based on powdered activated coconut charcoal and moisture-containing ceramsite / O. V. Boiprav, S. E. Savanovich, E. S. Belousova // *Mater. Phys. Mech.* – 2022. – Vol. 50, № 3. – P. 420–430. https://doi.org/10.18149/MPM.5032022_6
4. Pattanayak, S. S. Design from waste: an eco-efficient microwave absorber using dried banana leaves and charcoal based composite / S. S. Pattanayak, S. H. Laskar, S. Sahoo // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2022. – Vol. 33. – P. 13398–13407. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08276-9>
5. Бойправ, О. В. Перспективные слоистые гибкие радиопоглощающие материалы на основе порошкообразного угля / О. В. Бойправ, В. А. Богуш // *Перспектив. материалы.* – 2023. – № 8. – С. 15–26.
6. Ayad, H. Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials / H. Ayad, O. Boiprav, L. Lynkou. – Minsk: Bestprint, 2020. – 122 p.
7. Transport properties of alkali/alkaline earth cations in ionic-liquid based electrolytes / H. P. Khanh Ngo [et al.] // *J. Ionic Liq.* – 2022. – Vol. 2, Iss. 2. – Art. ID 100044. <https://doi.org/10.1016/j.jil.2022.100044>
8. Pinho, S. P. Solubility of NaCl, NaBr, and KCl in Water, Methanol, Ethanol, and Their Mixed Solvents / S. P. Pinho, E. A. Macedo // *J. Chem. Eng. Data.* – 2005. – Vol. 50, № 1. – P. 29–32. <https://doi.org/10.1021/jc049922y>
9. Anomalous microwave reflection from a metal surface induced by spoof surface plasmon / W. Liang [et al.] // *Chinese Phys. B.* – 2012. – Vol. 21, № 1. – Art. ID 017301. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/1/017301>
10. Charcoal- and Foil-Containing Materials for Radio Electronic Control Systems Protection from Electromagnetic Interferences / O. Boiprav [et al.] // 2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA), 19–21 Dec. 2022, Sousse, Tunisia. – P. 299–304. <https://doi.org/10.1109/STA56120.2022.10019059>
11. Coherent Scattering of Microwaves by Particles: Evidence from Clouds and Smoke / J. S. Erkelens [et al.] // *J. Atmos. Sci.* – 2001. – Vol. 58, iss. 9. – P. 1091–1102. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1091:CSOMBP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1091:CSOMBP>2.0.CO;2)
12. Microwave scattering properties of sand particles: Application to the simulation of microwave radiances over sandstorms / G. Hong [et al.] // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* – 2008. – Vol. 109, № 4. – P. 684–702. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2007.08.018>
13. Sterlyadkin, V. V. Some Aspects of the Scattering of Light and Microwaves on Non-Spherical Raindrops / V. V. Sterlyadkin // *Atmosphere.* – 2020. – Vol. 11, iss. 5. – Art. ID 531. <https://doi.org/10.3390/atmos11050531>
14. Shukla, V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients / V. Shukla // *Nanoscale Adv.* – 2019. – Iss. 5. – P. 1640–1671. <https://doi.org/10.1039/C9NA00108E>
15. Quantitative Interpretation of Electromagnetic Interference Shielding Efficiency: Is It Really a Wave Absorber or a Reflector? / U. Hwang [et al.] // *ACS Omega.* – 2022. – Vol. 7, № 5. – P. 4135–4139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05657>
16. Gaoui, B. Enhancement of the shielding effectiveness of multilayer materials by gradient thickness in the stacked layers / B. Gaoui, A. Hadjadj, M. Kious // *J. Mater. Sci.: Mater. Electron.* – 2017. – Vol. 28. – P. 11292–11299. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6920-8>
17. Effect of double-layer composite absorbing coating on shielding effectiveness of electromagnetic shielding fabric / J. Duan [et al.] // *Mater. Res. Express.* – 2019. – Vol. 6, № 8. – Art. ID 086109. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1d2d>

References

1. Chuayjumnong S., Karrila S., Jumratb S., Pianroj Y. Activated carbon and palm oil fuel ash as microwave absorbers for microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell waste. *RSC Advances*, 2020, iss. 53, pp. 32058–32068. <https://doi.org/10.1039/D0RA04966B>
2. Negi P., Kumar Chhantyal A. K., Dixit A. K., Kumar S., Kumar A. Activated carbon derived from mango leaves as an enhanced microwave absorbing material. *Sustainable Materials and Technologies*, 2021, vol. 27, art. ID e00244. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2020.e00244>
3. Boiprav O. V., Savanovich S. E., Belousova E. S. Flexible microwave absorbers based on powdered activated coconut charcoal and moisture-containing ceramsite. *Materials Physics and Mechanics*, 2022, vol. 50, no. 3, pp. 420–430. https://doi.org/10.18149/MPM.5032022_6
4. Pattanayak S. S., Laskar S. H., Sahoo S. Design from waste: an eco-efficient microwave absorber using dried banana leaves and charcoal based composite. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2022, vol. 33, pp. 13398–13407. <https://doi.org/10.1007/s10854-022-08276-9>
5. Boiprav O. V., Bogush V. A. Advanced layered flexible radio-absorbing materials based on powdered charcoal. *Perspektivnye materialy*, 2023, no. 8, pp. 15–26 (in Russian).
6. Ayad H., Boiprav O. V., Lynkov L. M. *Electromagnetic Shields Based on Powdered Coal-Containing Materials*. Minsk, Bestprint Publ., 2020. 122 p.
7. Khanh Ngo H. P., Planes E., Iojoiu C., Soudant P., Rollet A.-L., Judeinstein P. Transport properties of alkali/alkaline earth cations in ionic-liquid based electrolytes. *Journal of Ionic Liquids*, 2022, vol. 2, no. 2, art. ID 100044. <https://doi.org/10.1016/j.jil.2022.100044>

8. Pinho S. P., Macedo E. A. Solubility of NaCl, NaBr, and KCl in Water, Methanol, Ethanol, and Their Mixed Solvents. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 2005, vol. 50, no. 1, pp. 29–32. <https://doi.org/10.1021/jc049922y>
9. Liang W., Jin-Xiang C., You L., Lei L., Yin-Chang D., Jia W. Anomalous microwave reflection from a metal surface induced by spoof surface plasmon. *Chinese Physics B*, 2012, vol. 21, no. 1, art. ID 017301. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/21/1/017301>
10. Boiprav O., Ayad H., Abdaljlil S. A., Lynkou L., Abdulmawlay M. Charcoal- and Foil-Containing Materials for Radio Electronic Control Systems Protection from Electromagnetic Interferences. *2022 IEEE 21st International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, December 2022, pp. 299–304. <https://doi.org/10.1109/STA56120.2022.10019059>
11. Erkelens J. S., Venema V. K. C., Russchenberg H. W. J., Ligthart L. P. Coherent Scattering of Microwaves by Particles: Evidence from Clouds and Smoke. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2001, vol. 58, iss. 9, pp. 1091–1102. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1091:CSOMBP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1091:CSOMBP>2.0.CO;2)
12. Hong G., Yang P., Weng F., Liu Q. Microwave scattering properties of sand particles: Application to the simulation of microwave radiances over sandstorms. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2008, vol. 109, no. 4, pp. 684–702. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2007.08.018>
13. Sterlyadkin V. V. Some Aspects of the Scattering of Light and Microwaves on Non-Spherical Raindrops. *Atmosphere*, 2020, vol. 11, iss. 5, art. ID 531. <https://doi.org/10.3390/atmos11050531>
14. Shukla V. Review of electromagnetic interference shielding materials fabricated by iron ingredients. *Nanoscale Advances*, 2019, iss. 5, pp. 1640–1671. <https://doi.org/10.1039/C9NA00108E>
15. Hwang U., Kim J., Seol M., Lee B. Park I.-K., Suhr J., Nam J.-D. Quantitative Interpretation of Electromagnetic Interference Shielding Efficiency: Is It Really a Wave Absorber or a Reflector? *ACS Omega*, 2022, vol. 7, no. 5, pp. 4135–4139. <https://doi.org/10.1021/acsomega.1c05657>
16. Gaoui B., Hadjadj A., Kious M. Enhancement of the shielding effectiveness of multilayer materials by gradient thickness in the stacked layers. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, vol. 28, pp. 11292–11299. <https://doi.org/10.1007/s10854-017-6920-8>
17. Duan J., Wang X., Li Y., Liu Z. Effect of double-layer composite absorbing coating on shielding effectiveness of electromagnetic shielding fabric. *Materials Research Express*, 2019, vol. 6, no. 8, art. ID 086109. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab1d2d>

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-225-232>
УДК 621.313



Оригинальная статья

А. Б. Менжинский^{1*}, С. В. Пантелеев¹, П. Б. Менжинский², А. Л. Сицко¹

¹Военная академия Республики Беларусь, пр. Независимости, 220, 220057,
Минск, Республика Беларусь

²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, ул. Ожешко 22, 230023,
Гродно, Республика Беларусь

**СТРУКТУРА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА.
ЧАСТЬ 1**

Аннотация. Разработаны структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока и математическая модель его электромеханической части, учитывающая влияние температуры на сопротивление обмотки якоря. Программно-аппаратный комплекс реализуется на плате Arduino Uno. Отличительной особенностью комплекса является модульная структура, позволяющая проводить исследования электрических машин постоянного тока в различных режимах работы (пуск, регулирование частоты вращения якоря, реверсирование, торможение). Кроме того, имеется возможность реализации различных законов изменения нагрузочного момента, для чего в состав программно-аппаратного модуля входят исследуемая и нагрузочная электрические машины постоянного тока, которые механически соединены между собой с помощью муфты и работают в двигательном и генераторном режимах соответственно. Предложенная модель позволяет описывать электромагнитные процессы в электрических машинах постоянного тока с учетом влияния температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрева отдельных частей электрической машины. Представленный программно-аппаратный комплекс может найти практическое применение в исследовательских лабораториях при исследовании электрических машин постоянного тока в различных режимах работы.

Ключевые слова: электрические машины постоянного тока, структура, программно-аппаратный комплекс, математическая модель, микроконтроллер

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Менжинский Андрей Борисович – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры Военной академии Республики Беларусь. E-mail: volna05011990@mail.ru; Пантелеев Станислав Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры Военной академии Республики Беларусь. E-mail: rantelev-s-v@mail.ru; Менжинский Павел Борисович – магистр технических наук, старший преподаватель кафедры Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. E-mail: mpb93@mail.ru; Сицко Александр Леонидович – кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры Военной академии Республики Беларусь. E-mail: 6869108@gmail.com

Вклад авторов: Менжинский Андрей Борисович – обоснование концепции, планирование исследования, разработка структуры и математического описания программно-аппаратного комплекса, разработка программного обеспечения в среде программирования Arduino IDE, обобщение результатов исследования; написание и оформление текста рукописи; Пантелеев Станислав Владимирович – участие в разработке математического описания программно-аппаратного комплекса, сбор, анализ и систематизация данных, обобщение результатов исследования, обсуждение результатов исследования, написание и редактирование текста рукописи; Менжинский Павел Борисович – обобщение и обсуждение результатов исследования, участие в разработке математического описания программно-аппаратного комплекса, написание текста рукописи и работа с графическим материалом; Сицко Александр Леонидович – обсуждение результатов исследования, участие в разработке и математическом описании программно-аппаратного комплекса.

Для цитирования: Структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока. Часть 1 / А. Б. Менжинский [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 225–232. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-225-232>

Поступила в редакцию: 22.12.2023

Доработанный вариант: 25.03.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author.

*Original article*Andrey B. Menzhinsky^{1*}, Stanislav V. Pantelev¹, Pavel B. Menzhinsky², Alexander L. Sitsko¹¹Military Academy of the Republic of Belarus, 220, Nezavisimosty Ave., 220057, Minsk, Republic of Belarus²Grodno State University named after Yanka Kupala, 22, Ozheshko Str., 230023, Grodno, Republic of BelarusSTRUCTURE OF SOFTWARE AND HARDWARE MODULE FOR RESEARCH
OF DC ELECTRICAL MACHINES.
PART 1

Abstract. The structure of a hardware and software complex for the study of DC electric machines and a mathematical model of its electromechanical part taking into account the influence of temperature on the resistance of the armature winding have been developed. The hardware and software complex is implemented on the Arduino Uno board. A distinctive feature of which is the modular structure, which allows conducting research on DC electric machines in various operating modes (start-up, armature speed control, reversing, braking). In addition, it is possible to implement various laws of changing the load moment. For this purpose, the hardware and software module include the studied and load DC electric machines, which are mechanically connected to each other by means of a coupling and operate in motor and generator modes, respectively. The proposed model makes it possible to describe electromagnetic processes in DC electric machines taking into account the influence of temperature on the resistance of the armature winding, as well as overheating of individual parts of the electric machine. The proposed hardware and software module can find practical application in research laboratories in the study of DC electric machines in various operating modes.

Keywords: DC electrical machines, structure, hardware and software module, mathematical model, microcontroller

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Author information: *Andrey B. Menzhinsky* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Deputy Head of the Department at Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: volna05011990@mail.ru; *Stanislav V. Pantelev* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department at Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: pantelev-s-v@mail.ru; *Pavel B. Menzhinsky* – Master of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department at Grodno State University named after Yanka Kupala. E-mail: mpb93@mail.ru; *Alexander L. Sitsko* – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department at Military Academy of the Republic of Belarus. E-mail: 6869108@gmail.com

Authors' contributions: *Andrey B. Menzhinsky* – substantiation of the concept, research planning, development of the structure and mathematical description of the hardware and software module, software development in the Arduino IDE programming environment, generalization of research results; writing and formatting of the manuscript text; *Stanislav V. Pantelev* – participation in the development of a mathematical description of the hardware and software module, data collection, analysis and systematization, summarizing the results of the study, discussing the results of the study, writing and editing the text of the manuscript; *Pavel B. Menzhinsky* – generalization and discussion of research results, participation in the development of a mathematical description of a hardware and software module, writing the text of a manuscript and working with graphic material; *Alexander L. Sitsko* – discussion of the research results, participation in the development and mathematical description of the hardware and software complex.

For citation: Menzhinsky A. B., Pantelev S. V., Menzhinsky P. B., Sitsko A. L. Structure of software and hardware module for research of DC electrical machines. Part 1. *Vesti Natsyyanal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 225–232 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-225-232>

Received: 22.12.2023

Modified: 25.03.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. В настоящее время электрические машины постоянного тока (ЭМПТ) находят широкое применение в электромеханических системах различного назначения, промышленности, транспорте и робототехнике [1, 2]. Широкое применение ЭМПТ обусловлено хорошими пусковыми свойствами, управляемостью, а также устойчивостью к перегрузкам [1, 3, 4]. В связи с этим в Республике Беларусь и в зарубежных странах большое внимание уделяется теоретическим и экспериментальным исследованиям таких электрических машин [1, 3–8].

Достоверность новых научных результатов, полученных в процессе исследования ЭМПТ, может быть проверена только при работе с реальным объектом. В связи с этим для исследования таких электрических машин актуальна разработка программно-аппаратного комплекса.

Потери энергии, возникающие в ЭМПТ, выделяются в виде теплоты, повышающей температуру обмотки якоря, магнитопровода и постоянных магнитов (ПМ). Высокая температура обмотки якоря является одной из основных причин вызывающих старение изоляции [9]. Повышение температуры ПМ ухудшает их характеристики [10]. Указанные условия приводят к уменьшению

срока службы и ухудшению энергетических показателей ЭМПТ¹. В связи с этим учет влияния температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрева отдельных частей (обмотки и ППМ) электрических машин при их математическом описании и исследовании весьма важен.

Таким образом, разработка структуры программно-аппаратного комплекса для исследования ЭМПТ, а также математического описания электромагнитных процессов происходящих в его электромеханической части с учетом влияния температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрева отдельных частей электрической машины, представляет особую актуальность и по этой причине явилась целью настоящего исследования.

Структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока. В состав программно-аппаратного комплекса для исследования ЭМПТ (рис. 1) входят: автоматический выключатель дифференциального тока АВДТ 32 С16 30мА TDM; импульсный источник питания AC-DC 12 В, 5 А; плата Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328; драйвер L298N; датчик частоты вращения якоря (вала) на основе модуля датчика Холла YS-27; внешний регулятор оборотов (потенциометр); коллекторные ЭМПТ (в качестве примера, maxon A-max) с магнитоэлектрическим возбуждением² (могут использоваться и другие коллекторные ЭМПТ с магнитоэлектрическим возбуждением); проволочный переменный лабораторный реостат (ППЛР); реле TONGLING IQC-3FF-S-Z; керамический нагрузочный резистор (КНР); цифровой осциллограф марки GDS-71102 и мультиметр марки UT71E; датчик тока ACS712; датчик напряжения MH-Electronic; персональная электронная вычислительная машина (ПВЭМ) на базе процессора Intel(R) Celeron(R) CPU1 000M 1,8 ГГц.

Электромеханическая часть программно-аппаратного комплекса представляет собой совокупность исследуемой и нагрузочной ЭМПТ. Исследуемая и нагрузочная ЭМПТ механически соединены между собой с помощью муфты и работают в двигательном (двигатель постоянного тока, ДПТ) и генераторном (генератор постоянного тока) режимах соответственно. Нагрузочная электрическая машина входит в состав модуля формирования нагрузочного момента. Мощность нагрузочной электрической машины должна быть соизмерима с мощностью исследуемой.

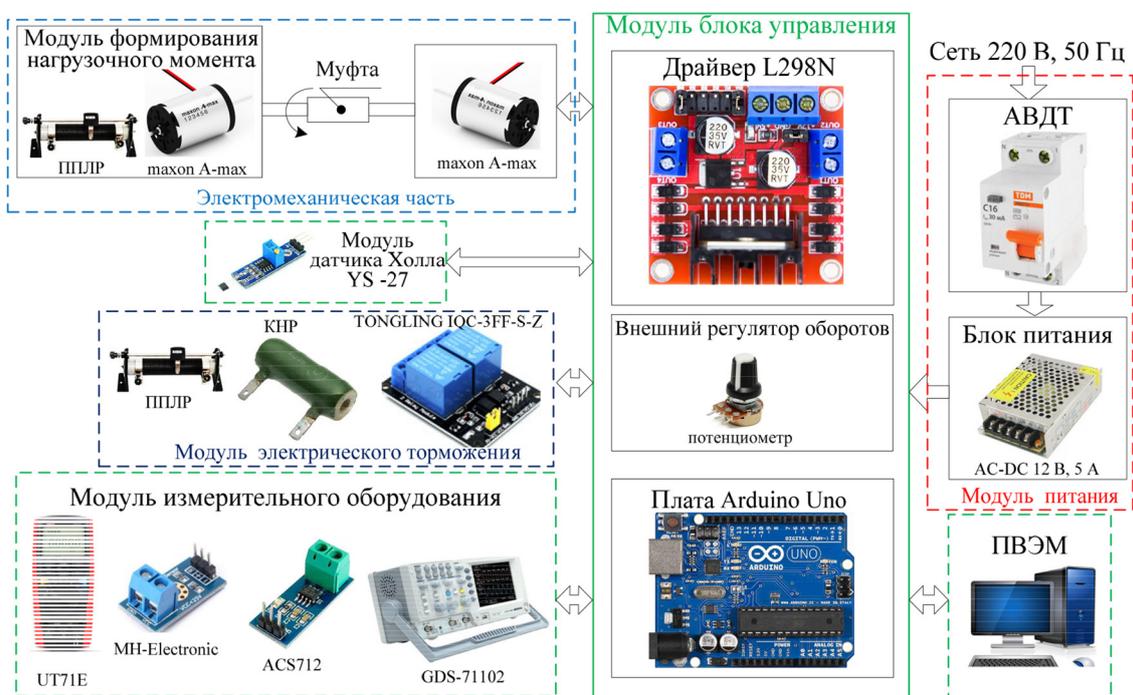


Рис. 1. Структура программно-аппаратного комплекса для исследования электрических машин постоянного тока

Fig. 1. The structure of the hardware and software complex for the study of DC electric machines

¹ Высокоточные приводы и системы. Руководство по выбору. Maxon motor, 2018/2019. 508 с. URL: https://avi-solutions.com/upload/iblock/563/maxon_motor_program_2018_19_RU.pdf (дата обращения: 20.12.2023).

² Там же.

Математическое описание электромагнитных процессов, происходящих в электромеханической части программно-аппаратного комплекса (в двигательном и генераторном режимах), с учетом влияния температуры на сопротивление обмотки якоря осуществляется системой уравнений [6, 10–12]

$$\begin{cases} U = E_{\text{пр}} + I_{\text{я}} R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right); \\ U_{\text{Г}} = E_{\text{я}} - I_{\text{н}} R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right); \\ M_{\text{дин}} = J d\omega/dt = M_{\text{эм}} - M_{\text{с}}, \end{cases} \quad (1)$$

где U – напряжение, подаваемое на двигатель (в цепь якоря); $E_{\text{пр}}$ – противо-ЭДС, определяемая по формуле $E_{\text{пр}} = C_e n \Phi_{\text{в}}$ (C_e – коэффициент ЭДС, определяемый конструкцией машины (электрическая постоянная), n – частота (скорость) вращения якоря (вала), $\Phi_{\text{в}}$ – магнитный поток возбуждения (формируемый ПМ)); $I_{\text{я}}$ – ток цепи якоря; $R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}}$ – сопротивление обмотки якоря при нормальной температуре ($t = 20^{\circ}\text{C}$); $\alpha_{\text{м}}$ – температурный коэффициент сопротивления для меди; $t_{\text{я}}^{\circ}$ – температура обмотки якоря; $U_{\text{Г}}$ – напряжение на зажимах ЭМПТ работающей в генераторном режиме; $E_{\text{я}}$ – ЭДС якоря; $I_{\text{н}}$ – ток в цепи якоря (ток нагрузки); $M_{\text{дин}}$ – динамический момент; J – момент инерции; ω – угловая скорость якоря; $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный (вращающий) момент, определяемый по выражению $M_{\text{эм}} = C_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi_{\text{в}}$ ($C_{\text{м}}$ – механическая постоянная двигателя, зависящая от его конструкции); $M_{\text{с}}$ – нагрузочный момент (момент сопротивления), действующий на исследуемую ЭМПТ.

Различают следующие основные режимы работы ДПТ: пуск; регулирование частоты (скорости) вращения якоря; реверсирование (изменения направления вращения вала двигателя); торможение [6].

В программно-аппаратном комплексе для включения указанного двигателя применяются: прямой пуск; пуск путем плавного повышения напряжения. Наличие широкого спектра цифрового измерительного оборудования и программной модели, реализованной в Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328, позволяет получить пусковую характеристику ДПТ.

При прямом пуске обмотка якоря подключается непосредственно к сети. В начале пуска $n = 0$, следовательно $E_{\text{пр}} = 0$. Поэтому пусковой ток якоря равен

$$I_{\text{я.п}} = \frac{U}{R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right)}. \quad (2)$$

Пусковая характеристика ДПТ качественно изображена на рис. 2.

Частота вращения якоря ЭМПТ регулируется изменением напряжения U , подводимого в цепь якоря. Частота вращения якоря исследуемой ЭМПТ определяется из системы уравнений (1)

$$n = \frac{U - I_{\text{я}} R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ})\right)}{C_e \Phi_{\text{в}}}. \quad (3)$$

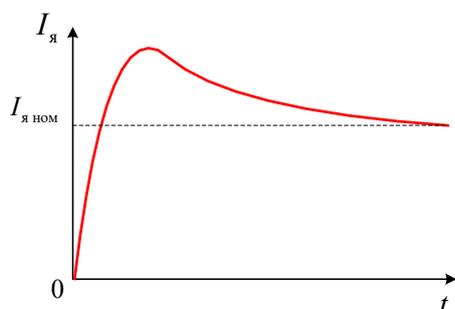


Рис. 2. Пусковая характеристика двигателя постоянного тока

Fig. 2. Starting characteristic of DC motor

Для управления ЭМПТ используется драйвер L298N, в состав которого входят два H-моста [2]. Драйвер также позволяет реализовать режим реверсирования. В режиме реверсирования изменяется направление тока $I_{\text{я}}$, что приводит к изменению направления электромагнитного момента $M_{\text{эм}}$.

Модуль электрического торможения позволяет реализовать динамическое торможение и торможение противовключением. При динамическом торможении якорь ДПТ отключается от сети и замыкается на КНР. Двигатель при этом переходит в генераторный режим работы, превращая механическую энергию вращения якоря в электрическую, которая рассеивается в виде тепла на резисторе. Направ-

ления тока $I_{\text{я}}$ и момента $M_{\text{эм}}$ изменяются на противоположные. Следовательно, момент $M_{\text{эм}}$ становится тормозящим. Под действием тормозного момента скорость вращения якоря снижается. Торможение противовключением применяют для быстрой остановки ДПТ. Для реализации такого торможения изменяют полярность напряжения U , приложенного к якорю. В момент остановки якоря напряжение отключается.

Модуль формирования нагрузочного момента создает нагрузочный момент, действующий на исследуемую электрическую машину. Частота вращения якоря ЭМПТ измеряется с помощью модуля датчика Холла YS-27 и программной модели, реализованной в Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328. Таким образом, представляется возможным установить зависимость частоты вращения якоря от других параметров (электрических, электромагнитных величин) электрической машины.

Регулировочная и механическая характеристики двигателя постоянного тока. Регулировочная характеристика представляет собой зависимость $n = f(U)$ при $M_c = \text{const}$ и $\Phi_B = \text{const}$. Учитывая, что в установившемся режиме работы $M_{\text{эм}} = M_c$, следовательно $I_{\text{я}} = M_c / C_M \Phi_B$, то из уравнения (3) получим

$$n = \frac{U}{C_e \Phi_B} - \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_e C_M \Phi_B^2}. \quad (4)$$

Используя уравнение (4), получим выражение регулировочной характеристики ДПТ

$$n(U) = \frac{1}{C_e \Phi_B} \left(U - \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_M \Phi_B} \right) = \frac{1}{C_e \Phi_B} (U - U_{\text{тр}}), \quad (5)$$

где $U_{\text{тр}} = \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_M \Phi_B}$ – напряжение трогания (начала вращения) якоря.

В режиме холостого хода $M_c = 0$, следовательно

$$U_{\text{тр}} = \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_M \Phi_B} = 0. \quad (6)$$

Поэтому выражение (5) в режиме холостого хода примет вид:

$$n(U) = \frac{U}{C_e \Phi_B}. \quad (7)$$

Механическая характеристика ДПТ представляет зависимость $n = f(M_c)$ при $U = \text{const}$ и $\Phi_B = \text{const}$. Эту зависимость получим из уравнения (4)

$$n(M_c) = \frac{U}{C_e \Phi_B} - \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right) M_c}{C_e C_M \Phi_B^2} = n_0 - a M_c, \quad (8)$$

где $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi_B}$ – частота вращения якоря (вала) в режиме холостого хода; $a = \frac{R_{\text{я}20^\circ\text{C}} \left(1 + \alpha_M (t_{\text{я}}^\circ - 20^\circ)\right)}{C_e C_M \Phi_B^2}$ –

постоянный коэффициент, определяемый конструкцией двигателя.

Регулировочная и механическая характеристики ДПТ качественно изображены на рис. 3.

Коэффициент полезного действия (КПД) ДПТ равен [6, 11]

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\% = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} 100\%, \quad (9)$$

где P_1 – подводимая к двигателю электрическая мощность, определяемая по выражению $P_1 = UI_{\text{я}}$; P_2 – полезная мощность двигателя, равная механической мощности на его валу; ΔP – мощность потерь.

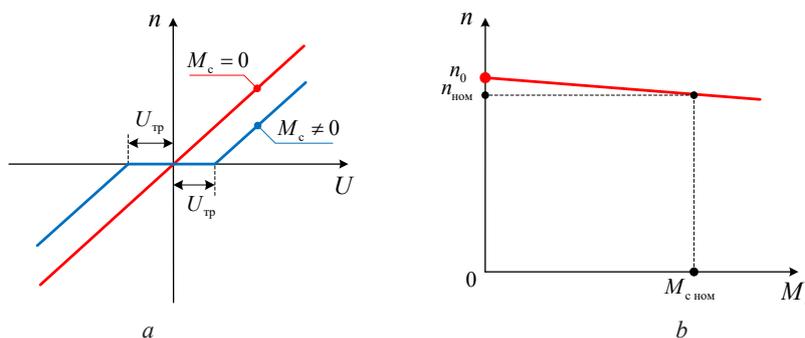


Рис. 3. Характеристики двигателя постоянного тока: *a* – регулировочная; *b* – механическая ($n_{\text{ном}}$ – частота вращения якоря при $M_{\text{с ном}}$; $M_{\text{с ном}}$ – номинальный нагрузочный момент)

Fig. 3. Characteristics of DC motor: *a* – adjustable; *b* – mechanical ($n_{\text{ном}}$ – the rotation frequency of the armature at $M_{\text{с ном}}$; $M_{\text{с ном}}$ – rated load torque)

При расчете КПД ЭМПТ к основным потерям (без учета потерь в щеточно-коллекторном узле) отнесем тепловые потери в обмотке якоря, то есть в меди $P_{\text{п.м}}$:

$$P_{\text{п.м}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ}) \right). \quad (10)$$

С учетом (10) выражение (9) запишем следующим образом:

$$\eta = \frac{UI_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ}) \right)}{UI_{\text{я}}} 100\%. \quad (11)$$

Оценка теплового состояния ЭМПТ. Уравнение теплового баланса в установившемся состоянии имеет вид [10]

$$P_{\text{с}} = \alpha_0 S_{\Sigma} \Delta t_K^{\circ}, \quad (12)$$

где $P_{\text{с}}$ – суммарные греющие потери (потери вызывающие нагрев ЭМПТ); α_0 – коэффициент теплоотдачи поверхности корпуса при естественном охлаждении; S_{Σ} – суммарная площадь поверхности корпуса; Δt_K° – превышение температуры корпуса над температурой окружающей среды (перегрев корпуса).

Для расчета α_0 в практике проектирования регулируемых синхронных вентильных двигателей с ПМ пользуются формулой [10]

$$\alpha_0 \approx 9 + 0,067 \Delta t_K^{\circ}. \quad (13)$$

Подставляя выражение (13) в уравнение (12), получим

$$0,067 S_{\Sigma} (\Delta t_K^{\circ})^2 + 9 S_{\Sigma} \Delta t_K^{\circ} - P_{\text{с}} = 0. \quad (14)$$

Согласно уравнению (14), перегрев корпуса может быть определен как

$$\Delta t_K^{\circ} = \left(\sqrt{81 S_{\Sigma}^2 + 0,268 S_{\Sigma} P_{\text{с}}} - 9 S_{\Sigma} \right) / 0,134 S_{\Sigma}. \quad (15)$$

Упростив уравнение (15), получим

$$\Delta t_K^{\circ} \approx \sqrt{\frac{4511 S_{\Sigma} + 14,9 P_{\text{с}}}{S_{\Sigma}}} - 67,2. \quad (16)$$

Так как основными потерями в ЭМПТ являются тепловые потери в обмотке якоря, то греющие потери равны

$$P_{\text{с}} = P_{\text{п.м}}. \quad (17)$$

Следовательно, уравнение (16) примет вид

$$\Delta t_K^{\circ} \approx \sqrt{\frac{4511 S_{\Sigma} + 14,9 I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}20^{\circ}\text{C}} \left(1 + \alpha_{\text{м}} (t_{\text{я}}^{\circ} - 20^{\circ}) \right)}{S_{\Sigma}}} - 67,2. \quad (18)$$

В выражении (18) не учитывается теплоотвод в местах крепления ЭМПТ к приводному двигателю или некоторой поверхности.

Зная Δt_K° , перегрев обмотки (Δt_M°) и ПМ ($\Delta t_{\text{ПМ}}^{\circ}$) можно рассчитать по выражениям [10]:

$$\Delta t_M^{\circ} \approx \Delta t_K^{\circ} + (10 \div 20 \text{ }^{\circ}\text{C}), \quad (19)$$

$$\Delta t_{\text{ПМ}}^{\circ} \approx \Delta t_M^{\circ} - 10 \text{ }^{\circ}\text{C}. \quad (20)$$

Программно-аппаратный комплекс для исследования ЭМПТ реализуется на плате Arduino Uno на основе микроконтроллера ATmega328, которая подключается к ПЭВМ по USB-кабелю. Платы семейства Arduino хорошо подходят для реализации различных мехатронных систем [14]. Основными преимуществами плат семейства Arduino являются: низкая стоимость; удобная для пользователя среда программирования; широкий спектр плат и датчиков, расширяющих функциональность Arduino для управления различными устройствами [13–15]. Для разработки программного обеспечения программно-аппаратного комплекса использовалась среда программирования Arduino IDE [13, 16]. Среда предназначена для написания, компиляции и загрузки кода программы в память микроконтроллера ATmega328, установленного на плате Arduino Uno. Для написания кода применяется упрощенная версия языка программирования C++, известная так же как Wiring [17].

Существуют версии среды программирования Arduino IDE для различных операционных систем (Windows, Linux и Macintosh OSX) [15]. Встроенный в среду программирования Arduino IDE плоттер по последовательному соединению позволяет наблюдать за изменением частоты вращения якоря и электрических величин электрической машины. Данные, полученные по USB-кабелю, далее обрабатываются на ПЭВМ с помощью широкого спектра прикладных программ для решения задач технических вычислений.

Заключение. Разработана структура программно-аппаратного комплекса для исследования ЭМПТ. Его отличительной особенностью является модульная структура, позволяющая проводить исследования ЭМПТ в различных режимах работы (пуск, регулирование частоты вращения якоря, реверсирование, торможение). Кроме того, имеется возможность реализации различных законов изменения нагрузочного момента.

Разработана математическая модель электромеханической части программно-аппаратного комплекса, учитывающая влияние температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрев отдельных частей электрической машины. Данная модель позволяет описывать электромагнитные процессы в электрических машинах постоянного тока с учетом влияния температуры на сопротивление обмотки якоря, а также перегрева отдельных частей электрической машины.

Предложенный программно-аппаратный комплекс может найти практическое применение в исследовательских лабораториях при исследовании ЭМПТ в различных режимах работы. Научная значимость полученных результатов заключается в развитии теории электромеханики применительно к ЭМПТ.

Дальнейшим направлением совершенствования программно-аппаратного комплекса может быть внедрение в его структуру специализированного программного обеспечения для исследования электрических машин.

Список использованных источников

1. Хлопцов, А. С. Совершенствование методики и средств диагностирования технического состояния коллекторно-щеточного узла машин постоянного тока: дис. ... канд. техн. наук: 05.09.01 / А. С. Хлопцов. – Омск, 2016. – 154 л.
2. Алексеенко, К. Д. Применение микропроцессорной платформы «Ардуино» в учебной среде для практического изучения основ электропривода / К. Д. Алексеенко, И. А. Носенко // Современные прикладные исследования: материалы 5-й нац. науч.-практ. конф., Шахты, 17–19 марта 2021 г. – Новочеркасск: Юж.-Рос. госуд. политех. ун-т (НПИ) им. М. И. Платова, 2021. – Т. 1. – С. 195–200.
3. Овчинников, И. Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность): курс лекций / И. Е. Овчинников. – СПб.: КОРОНА-Век, 2006. – 336 с.
4. Васильев, Д. С. Векторные системы управления электроприводами: учеб. пособие / Д. С. Васильев, Б. И. Фираго. – Минск: Выш. шк., 2016. – 159 с.
5. Фираго, Б. И. Теория электропривода: учеб. пособие / Б. И. Фираго, Л. Б. Павлячик. – Изд. 2-е. – Минск: Техноперспектива, 2007. – 585 с.
6. Иванов, И. И. Электротехника: учеб. пособие / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев. – 6-е изд. – СПб.: Лань, 2009. – 496 с.

7. Shin, W. G. Correlation analysis of brush temperature in brush-type DC motor for predicting motor life / W. G. Shin, Y. S. Song, Y. K. Seo // *J. Mech. Sci. Technol.* – 2012. – Vol. 26, Iss. 7. – P. 2151–2154. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0534-0>
8. A New Method for Sensorless Estimation of the Speed and Position in Brushed DC Motors Using Support Vector Machines / E. Vazquez-Sanchez [et al.] // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2011. – Vol. 59, № 3. – P. 1397–1408. <http://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161651>
9. Брускин, Д. Э. Электрические машины и микромашины: учебник / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1990. – 527 с.
10. Хитерер, М. Я. Синхронные электрические машины возвратно-поступательного движения: учеб. пособие / М. Я. Хитерер, И. Е. Овчинников. – СПб.: Корона принт, 2013. – 357 с.
11. Менжинский, А.Б. Электротехника : учеб. пособие / А. Б. Менжинский, А. Е. Каледа, А. Л. Сицко; под общ. ред. А. Б. Менжинского. – Минск: Воен. акад. Респ. Беларусь, 2022. – 529, [3] с.
12. Черный, В. В. Температурная зависимость сопротивления полупроводников и металлов: учеб.-метод. пособие / В. В. Черный, В. Э. Малаховская. – Минск: БНТУ, 2016. – 36 с.
13. Петин, В. А. Проекты с использованием контроллера Arduino / В. А. Петин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2014. – 400 с.
14. Краткий обзор и перспективы применения микропроцессорной платформы Arduino / Е. Я. Омельченко [и др.] // *Электротехн. системы и комплексы.* – 2013. – № 21. – С. 28–33.
15. Выдрин, Д. Ф. Платформа Ардуино: преимущества / Д. Ф. Выдрин, А. О. Махнева, А. Р. Мавлютов // *Academy.* – 2017. – № 1 (16). – С. 9–12.
16. Шатуновский, В. Л. Комплекс для измерения электрических величин в системах электропитания на базе микроконтроллерных плат «Ардуино» / В. Л. Шатуновский, Н. Н. Портнягин, И. А. Мелик-Шахназарова // *Электротехн. и информ. комплексы и системы.* – 2018. – Т. 14, № 1. – С. 81–87.
17. Контроллер Ардуино / О. В. Царегородцева [и др.] // *Современные технологии: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. XXVIII Междунар. науч.-практ. конф., Пенза, 25 мая 2019 г.* – Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г. Ю.), 2019. – С. 102–106.

References

1. Khloptsov A. S. *Improving Methods and Means for Diagnosing the Technical Condition of the Commutator-Brush Assembly of DC Machines.* Omsk, 2016, 154 p. (in Russian).
2. Alekseenko, K. D., Nosenko I. A. Application of the Arduino microprocessor platform in an educational environment for practical study of the fundamentals of electric drives. *Sovremennye prikladnye issledovaniya: materialy 5-i natsional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Shakhty, 17–19 marta 2021 g. T. 1* [Modern Applied Research: Proceedings of the 5th National Scientific and Practical Conference, Shakhty, March 17–19, 2021. Vol. 1]. Novocherkassk, South Russian State Polytechnic University named after M. I. Platova, 2021, pp. 195–200 (in Russian).
3. Ovchinnikov I. E. *Valve Electric Motors and Drives Based on Them (Low and Medium Power).* St. Petersburg, CORONA-Vek Publ., 2006. 336 p. (in Russian).
4. Vasil'ev D. S., Firago B. I. *Vector Control Systems for Electric Drives.* Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 2016, 159 p. (in Russian).
5. Firago B. I. *Electric Drive Theory.* Minsk, Technoperspektiva Publ., 2007. 585 p. (in Russian).
6. Ivanov I. I., Solov'ev, G. I. *Electrical Engineering.* St. Petersburg, Lan' Publ., 2009. 496 p. (in Russian).
7. Shin W. G., Song Y. S., Seo Y. K. Correlation analysis of brush temperature in brush-type DC motor for predicting motor life. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2012, vol. 26, iss. 7, pp. 2151–2154. <https://doi.org/10.1007/s12206-012-0534-0>
8. Vazquez-Sanchez E., Gomez-Gil J., Gamazo-Real J. C., Diez-Higuera J. F. A New Method for Sensorless Estimation of the Speed and Position in Brushed DC Motors Using Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011, vol. 59, no. 3, pp. 1397–1408. <http://doi.org/10.1109/TIE.2011.2161651>
9. Bruskin D. E., Zorohovich A. E., Hvostov B. C. *Electric Machines and Micromachines.* Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 527 p. (in Russian).
10. Khiterer M. Ya., Ovchinnikov I. E. *Synchronous Electric Reciprocating Machines.* St. Petersburg, Korona-print Publ., 2013. 357 p. (in Russian).
11. Menzhinski A. B., Kaleda A. E., Sicko A. L. *Electrical Engineering.* Minsk, Military Academy Republic of Belarus, 2022. 529 p. (in Russian).
12. Chernyi V. V., Malahovskaya V. E. *Temperature Dependence of Resistance of Semiconductors and Metals.* Minsk, Belarusian National Technical University, 2016. 36 p. (in Russian).
13. Petin V. A. *Projects Using Arduino Controller.* St. Petersburg, BHV-Petersburg Publ., 2014. 400 p. (in Russian).
14. Omel'chenko E. Ya., Tanich V. O., Maklakov A. S., Karyakina E. A. Brief overview and prospects for using the Arduino microprocessor platform. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrical Systems and Complexes], 2013, no. 21, pp. 28–33 (in Russian).
15. Vydrin D. F., Makhneva A. O., Mavlyutov A. R. Arduino platform: advantages. *Academy*, 2017, no. 1 (16), pp. 9–12 (in Russian).
16. Shatunovskii V. L., Portnyagin N. N., Melik-Shakhnazarova I. A. Complex for measuring electrical quantities in power supply systems based on Arduino microcontroller boards. *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy = Electrical and Data Processing Facilities and Systems*, 2018, no. 1, pp. 81–87 (in Russian).
17. Tsaregorodtseva O. V., Golovanova K. S., Bolgov D. N., Myskova E. V., Tsaregorodtsev M. E. Arduino controller. *Sovremennye tekhnologii: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sbornik statei XXVIII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii, Penza, 25 maya 2019 g.* [Modern Technologies: Topical Issues, Achievements and Innovations: Collection of Articles of the 28th International Scientific and Practical Conference, Penza, May 25, 2019]. Penza, “Nauka i Prosveshchenie” (IP Gulyaev G. Yu.), 2019, pp. 102–106 (in Russian).

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

ДИАГНОСТИКА И БЕЗОПАСНОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ И ПРИРОДНЫХ СИСТЕМ

DIAGNOSTICS AND SAFETY OF TECHNICAL AND ENVIRONMENT SYSTEMS

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-233-243>
УДК 544.723;544.58;621.039.736



Оригинальная статья

Н. А. Маковская, Т. Г. Леонтьева*, А. А. Баклай, Д. А. Кузьмук

Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси,
а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь

ВЛИЯНИЕ МИНЕРАЛИЗОВАННОГО РАСТВОРА НА ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ГЛИН ПРИ ИЗОЛЯЦИИ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Аннотация. Изучены минеральный состав, сорбционные и фильтрационные свойства образцов природных глин месторождений «Городное» Брестской области и «Марковское» Гомельской области. Установлено, что глинистый минерал монтмориллонит, входящий в состав глин, имеет в своей структуре иллитовую фазу, содержание которой в исследуемых образцах глин составляет 4,8 мас.% (месторождение «Городное») и 3,6 мас.% (месторождение «Марковское»). Показано, что иллитовая фаза в структуре монтмориллонита содержит высокоселективные центры сорбции ^{137}Cs . Сорбция ^{85}Sr в основном осуществляется на монтмориллоните. Установлено, что минерализованный раствор, моделирующий химический состав поровой влаги в случае проникновения воды и последовательного прохождения через слои бетон – Na-бентонит – бетон пункта захоронения радиоактивных отходов не влияет на сорбцию ^{137}Cs , но оказывает значительное влияние на сорбцию ^{85}Sr . Коэффициент распределения (K_d) ^{137}Cs для исследованных образцов глин из модельного минерализованного раствора составляет более 10^3 $\text{дм}^3/\text{кг}$, что свидетельствует о высоких сорбционных свойствах данных глин по отношению к ^{137}Cs . Значения K_d ^{85}Sr для образцов глин при сорбции из модельного минерализованного раствора в 30 раз ниже K_d ^{137}Cs , что связано в основном с конкуренцией ионов стронция и кальция. Установлено, что значения коэффициентов фильтрации для образцов глин из месторождений «Городное» и «Марковское» после взаимодействия с модельным минерализованным раствором возрастают в 2,4 и 1,3 раза соответственно по сравнению с необработанными образцами данных глин. Это свидетельствует о том, что глина месторождения «Марковское» более устойчива к воздействию модельного минерализованного раствора, чем глина месторождения «Городное». Установлено, что глина месторождения «Марковское» может быть использована в составе подстилающего экрана пункта захоронения низко- и среднеактивных отходов АЭС.

Ключевые слова: глины, иллит, монтмориллонит, сорбция, цезий, стронций, модельный минерализованный раствор, пункт захоронения радиоактивных отходов

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: Маковская Наталья Александровна – кандидат биологических наук, доцент, заведующий лабораторией радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by; Леонтьева Татьяна Геннадьевна – старший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны. E-mail: leontieva@sosny.bas-net.by; Баклай Анатолий Анатольевич – старший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: a.baklay@tut.by; Кузьмук Дарья Алексеевна – младший научный сотрудник лаборатории радиохимических исследований природных сред и экспертизы радиоактивных материалов Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны. E-mail: kuzmuk@sosny.bas-net.by

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Вклад авторов: *Маковская Наталья Александровна* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), разработка методологии исследования, анализ и обобщение литературных данных, планирование исследований по изучению сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr глинами, проведение сравнительного анализа, формулировка выводов, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи; *Леонтьева Татьяна Геннадьевна* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), анализ и обобщение литературных данных, пробоподготовка образцов глин, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов ^{137}Cs и ^{85}Sr , обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования, формулировка выводов, работа с графическим материалом, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи; *Баклай Анатолий Анатольевич* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), создание модели исследования, планирование исследований по изучению сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr глинами, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов ^{137}Cs и ^{85}Sr , применение статистических и математических методов для анализа результатов исследования, обобщение результатов исследования, интерпретация результатов исследования; *Кузьмук Дарья Алексеевна* – планирование исследований по изучению сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr глинами, проведение инструментальных исследований и измерений удельной активности растворов ^{137}Cs и ^{85}Sr , применение статистических и математических методов для анализа результатов исследования, критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до публикации рукописи), редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Влияние минерализованного раствора на защитные свойства глин при изоляции радиоактивных отходов / Н. А. Маковская [и др.] // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 233–243. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-233-243>

Поступила в редакцию: 24.01.2024

Доработанный вариант: 09.08.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article

Natalia A. Makovskaya, Tatiana G. Leontieva*, Anatoly A. Baklay, Darya A. Kuzmuk

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

EFFECT OF MINERALIZED SOLUTION ON PROTECTIVE PROPERTIES OF CLAYS IN RADIOACTIVE WASTE ISOLATION

Abstract. In this paper there were studied the mineral composition and sorption properties as well as filtration properties of natural clay samples from “Gorodnoe” deposit of Brest region and “Markovskoe” deposit of Gomel region. It was determined that clay mineral montmorillonite of the samples contains illite phase in the structure, which is 4,8 wt.% in “Gorodnoe” sample and 3,6 wt.% in “Markovskoe” sample. The illite phase was shown to contain highly selective sorption sites for ^{137}Cs . ^{85}Sr sorption mostly takes place on montmorillonite. It was determined that model mineralized solution (the solution imitating chemical composition of water solution if water penetrates a radioactive waste disposal and consequently passes through concrete, Na-bentonite and again concrete layers) doesn't affect ^{137}Cs sorption, but significantly affects ^{85}Sr sorption. Distribution coefficients (K_d) of ^{137}Cs sorption on studied clay samples are higher than $10^3 \text{ dm}^3/\text{kg}$, indicating high sorption properties of the clays towards ^{137}Cs . K_d ^{85}Sr for sorption on the clay samples in the model mineralized solution is 30 times lower than K_d ^{137}Cs mostly because of competition between strontium and calcium ions. It was determined that filtration coefficient values of clays from “Gorodnoe” and “Markovskoe” deposits are 2,4 and 1,3 times higher after being treated with the model mineralized solution than the filtration coefficient values for raw clay samples. Hence, the clay from “Markovskoe” deposit is more resistant to the influence of the model mineralized solution than the clay from “Gorodnoe” deposit. The overall results of the research state that the clay from “Markovskoe” deposit can be used in the underlying layer of low- and medium-level radioactive waste disposal facility at NPP.

Keywords: clays, illite, montmorillonite, sorption, cesium, strontium, model mineralized solution, radioactive waste disposal facility

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

Information about the authors: *Natalia A. Makovskaya* – Cand. Sci. (Biology), Associate Professor, Head of the Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: nata.mak@sosny.bas-net.by; *Tatiana G. Leontieva* – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: leontieva@sosny.bas-net.by; *Anatoly A. Baklay* – Senior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: a.baklay@tut.by; *Darya A. Kuzmuk* – Junior Researcher, Laboratory for Radiochemical Research of Natural Environments and Examination of Radioactive Materials at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: kuzmuk@sosny.bas-net.by

Contribution of the authors: *Natalia A. Makovskaya* – substantiation of the concept of the study (formulation of the idea, research goals and objectives), development of the research methodology, collection of literature data, planning research to study sorption of ^{137}Cs and ^{85}Sr on clays, comparative analysis, formulation of conclusions, critical revision of the text of the manuscript (including stages before the publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript; *Tatiana G. Leontieva* – substantiation of the concept of the study (formulation of the idea, research goals and objectives), analysis and generalization of literature data, preparation of clay samples, conducting instrumental studies and measurements of ^{137}Cs and ^{85}Sr activity in solutions, generalization of the results of the research, interpretation of the results of research formulation of conclusions, generalization and interpretation of research results, formulation of conclusions, work with graphic material, critical revision of the text of the manuscript (including stages before publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript; *Anatoly A. Baklay* – substantiation of the concept of the study (formulation of the idea, research goals and objectives), creation of a research model, planning research to study sorption of ^{137}Cs and ^{85}Sr on clays, conducting instrumental studies and measurements of ^{137}Cs and ^{85}Sr activity in solutions, the use of statistical and mathematical methods for data analysis, generalization and interpretation of research results; *Darya A. Kuzmuk* – planning research to study sorption of ^{137}Cs and ^{85}Sr on clays, conducting instrumental studies and measurements of ^{137}Cs and ^{85}Sr activity in solutions, the use of statistical and mathematical methods for data analysis, critical revision of the text of the manuscript (including stages before publication of the manuscript), editing of the text of the manuscript.

For citation: Makovskaya N. A., Leontieva T. G., Baklay A. A., Kuzmuk D. A. Effect of mineralized solution on protective properties of clays in radioactive waste isolation. *Vestsi Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 233–243 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-233-243>

Received: 24.01.2024

Modified: 09.08.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. Развитие атомной энергетики, в том числе и в Республике Беларусь, неразрывно связано с созданием эффективной системы безопасного обращения с радиоактивными отходами (РАО). В настоящее время введена в эксплуатацию Белорусская АЭС (БелАЭС) с реактором типа ВВЭР-1200, состоящая из двух энергоблоков. При ее работе будут образовываться и накапливаться РАО различного состава. В связи с этим для человека и окружающей среды особую актуальность приобретает проблема их долговременного и безопасного захоронения¹. Для решения данной проблемы в Республике Беларусь разработана концепция приповерхностного пункта захоронения РАО (ПЗРО) БелАЭС с использованием физических барьеров (буферная засыпка, подстилающий и покрывающий экраны) [1]. В этой концепции слой уплотненной глины в составе подстилающего экрана ПЗРО играет важную роль в обеспечении безопасности захоронения очень низко-, низко- и среднеактивных РАО на длительный период времени.

Для создания физических барьеров в составе ПЗРО требуется большое количество глинистых материалов [2]. Согласно рекомендациям МАГАТЭ для стран, эксплуатирующих АЭС, необходимо, по возможности, использовать местные глинистые материалы для снижения стоимости строительства ПЗРО [3]. Применение глин в составе подстилающего экрана позволяет ограничить доступ грунтовых вод к РАО (гидроизоляционная функция); создать условия, при которых массообмен между РАО и грунтовыми водами возможен только посредством диффузии; обеспечить эффективную сорбцию радионуклидов при разгерметизации емкостей с РАО (сорбционная функция) [4]. Исходя из вышеизложенного, основная защитная функция слоя глины в подстилающем экране ПЗРО заключается в предотвращении или снижении до допустимого уровня выхода радионуклидов в окружающую среду. Для выполнения этой функции глина должна иметь определенные защитные свойства – низкий коэффициент фильтрации (K_f , м/сут) и высокую сорбционную способность по отношению к радионуклидам. Согласно [5], при создании подстилающего экрана в ПЗРО применяются уплотненные глины, имеющие K_f не более 10^{-5} м/сут. В [6] установлено, что K_f зависит от минерального состава глин и тем ниже, чем больше содержание в ней монтмориллонита. Кроме того, сорбционные свойства природных глин по отношению к ^{137}Cs и ^{90}Sr значительно различаются и зависят от их минерального состава, содержания и структурных особенностей глинистых минералов, входящих в их состав, а также от условий сорбции радионуклидов [7–12].

¹ Стратегия обращения с радиоактивными отходами: утв. пост. Совета Министров Респ. Беларусь от 15.02.2023 № 128. URL: <https://pravo.by/document/?guid=12551&p0=C22300128&p1=1&p5=0> (дата обращения: 20.01.2024).

По данным [13], в случае проникновения воды (атмосферных осадков, грунтовой воды) в ПЗРО и прохождения через физические барьеры увеличивается ее pH и содержание катионов в ней, что может повлиять на фильтрационные и сорбционные свойства глин в составе подстилающего экрана [11, 14]. Таким образом, исследование закономерностей взаимодействия радионуклидов с глинами при изменении физико-химических условий в ПЗРО является актуальной задачей, решение которой направлено на обеспечение безопасности захоронения РАО на длительный период времени.

Ранее установлено, что образцы глин из месторождений «Городное» Брестской области и «Марковское» Гомельской области обладают наилучшими сорбционными свойствами по отношению к ^{137}Cs среди образцов глин, отобранных из семи белорусских месторождений [15].

Цель данной работы – изучение влияния минерализованного раствора на фильтрационные и сорбционные свойства глин месторождений «Городное» и «Марковское» для оценки возможности их использования в составе подстилающего экрана ПЗРО БелАЭС.

Объекты и методы исследований. В качестве объектов изучения использовались образцы природной глины, отобранные из промышленных месторождений Республики Беларусь: «Городное» Брестской области и «Марковское» Гомельской области.

Минерализованный раствор представляет собой раствор, насыщенный различными катионами и анионами, моделирующий состав поровой влаги при ее последовательном прохождении через слои бетон – буферная засыпка (Na-бентонит) – бетон ПЗРО (далее – модельный минерализованный раствор). Данный раствор готовили в соответствии с рекомендациями, описанными в [16, 17]. В качестве материалов для приготовления модельного минерализованного раствора использовали дистиллированную воду (pH 6,4), бетон (возраст более 50 лет) и образец бентонитовой глины месторождения «10-й Хутор» (Хакасия, Россия), переведенный в Na-форму согласно [18]. В табл. 1 приведен катионный и анионный составы полученного модельного минерализованного раствора с pH $7,8 \pm 0,2$.

Таблица 1. Состав модельного минерализованного раствора
Table 1. Composition of the model mineralized solution

Катионный состав	Содержание, мг/дм ³	Анионный состав	Содержание, мг/дм ³
[Na ⁺]	243,4	[NO ₃ ⁻]	2,1
[K ⁺]	13,5	[Cl ⁻]	240,3
[Ca ²⁺]	95,3	[SO ₄ ²⁻]	299,1
[Mg ²⁺]	1,5	[HCO ₃ ⁻]	103,7

Коэффициенты фильтрации для образцов глин до и после взаимодействия с модельным минерализованным раствором определяли по стандартной методике (ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации») на приборе ПФ-1. Минеральный состав образцов глин изучали методом рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре Ultima-N (Rigaku, Япония) с использованием CuK_α -излучения: диапазон съемки 2θ (2° – 70°), шаг $0,01$ – $0,02^\circ$, время накопления сигнала – не менее $0,3$ с на точку. Анализ результатов проводили согласно рекомендациям, описанным в [19, 20]. Количественный минеральный анализ осуществляли методом Ритвельда в программном пакете PROFEX GUI для BGMN. Удельную поверхность образцов глин исследовали методом низкотемпературной адсорбции азота (метод БЭТ) с использованием прибора ASAP-2010 (Micromeritics, США). Емкость катионного обмена (ЕКО) образцов глин определяли в соответствии с ГОСТ 21283-93 «Глина бентонитовая для тонкой и строительной керамики. Методы определения показателя адсорбции и емкости катионного обмена» по адсорбции метиленового голубого.

Эксперименты по изучению сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr (аналог ^{90}Sr) из растворов проводили методом ограниченного объема при следующих условиях: температура 20 ± 2 °C, периодическое перемешивание образца с аликвотой раствора. Перед проведением исследований образцы глин высушивали в сушильном шкафу при температуре 105 ± 5 °C до постоянной массы, затем растирали

в ступке и просеивали через сито с размером ячеек 1 мм. Удельная активность растворов, приготовленных с добавлением радиоактивной метки ^{137}Cs или ^{85}Sr , составляла $1,8 \cdot 10^6$ и $1,7 \cdot 10^6$ Бк/дм³ соответственно. Взаимодействие образца глины с раствором длилось 72 ч, что достаточно для установления сорбционного равновесия в системе глина–раствор [15]. Изотермы сорбции цезия и стронция получали при рН растворов 7,8, изменяя исходную концентрацию цезия в растворе от $4,1 \cdot 10^{-9}$ до 10^{-2} моль/дм³, а концентрацию стронция – от $2,3 \cdot 10^{-11}$ до 10^{-2} моль/дм³. Для экспериментов с высокой концентрацией цезия (более 10^{-7} моль/дм³) или стронция (более 10^{-9} моль/дм³) к раствору с радиоактивной меткой ^{137}Cs или ^{85}Sr добавляли необходимое количество стабильного CsCl или $\text{SrCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ марки х.ч. Изменение значения рН дистиллированной воды от 6,4 до 7,8 осуществляли с помощью раствора NaOH с концентрацией 0,1 моль/дм³. По результатам экспериментов рассчитывали коэффициент распределения (K_d , дм³/кг) цезия или стронция по формуле

$$K_d = \frac{A_0 - A_p}{A_p} \cdot \frac{V}{m}, \quad (1)$$

где A_0 и A_p – исходная и равновесная удельная активность ^{137}Cs или ^{85}Sr в растворе, Бк/дм³; V – объем раствора, дм³; m – масса образца глины, кг.

Содержание цезия или стронция в растворе (C_p , моль/дм³) и твердой фазе образца глины (C_r , моль/кг) определяли следующим образом:

$$C_p = \frac{C_0}{\left(1 + K_d \cdot \frac{m}{V}\right)}, \quad (2)$$

$$C_r = K_d \cdot C_p, \quad (3)$$

где C_0 и C_p – исходная и равновесная концентрации цезия или стронция в растворе, моль/дм³.

Отношение твердой и жидкой фаз во всех экспериментах составляло 10 г/дм³. Жидкую и твердую фазу разделяли центрифугированием при 10 000 об/мин в течение 15 мин. В полученном фильтрате определяли удельную активность ^{137}Cs или ^{85}Sr прямым спектрометрическим методом по линиям $E_\gamma = 662$ кэВ и 514 кэВ соответственно с использованием универсального спектрометрического комплекса РУС-91М.

Результаты исследований. Глины в составе подстилающего экрана должны сохранять стабильные фильтрационные и сорбционные свойства (то есть защитные свойства) в течение не менее 500 лет [1], поэтому минерализованная влага – это один из факторов агрессивного воздействия на физические барьеры, в состав которых входит глина. В рамках выполнения данной работы определена глина, наиболее устойчивая к воздействию модельного минерализованного раствора.

Исследования минерального состава образцов природных глин месторождений «Городное» (далее ГГ) и «Марковское» (далее ГМ) методом РФА показали, что в валовых образцах присутствуют глинистые минералы монтмориллонит и каолинит (рис. 1, *a* и *c*). Минерал иллит в образцах глин не обнаружен.

По данным [21], монтмориллонит проявляет высокие сорбционные свойства по отношению к ^{137}Cs , если в его структуре присутствует иллитовая фаза. Из рис. 1, *a* и *c* видно, что рефлексы $d_{(001)}$ монтмориллонита, входящего в состав образцов ГГ и ГМ, равные 14,52 и 14,57 Å соответственно, не симметричны, так как их левое крыло начинается выше, чем правое, что свидетельствует о присутствии в структуре монтмориллонита иллитовой фазы [22]. Дополнительные исследования методом РФА ориентированных препаратов глинистой фракции с размером частиц < 2 мкм, выделенной из образцов ГГ и ГМ, позволили установить присутствие иллитовой фазы в структуре монтмориллонита (см. рис. 1, *b* и *d*), содержание которой в образцах глин составляет 4,8 и 3,6 мас.% соответственно. По результатам исследований установлен минеральный состав образцов ГГ и ГМ, который приведен в табл. 2.

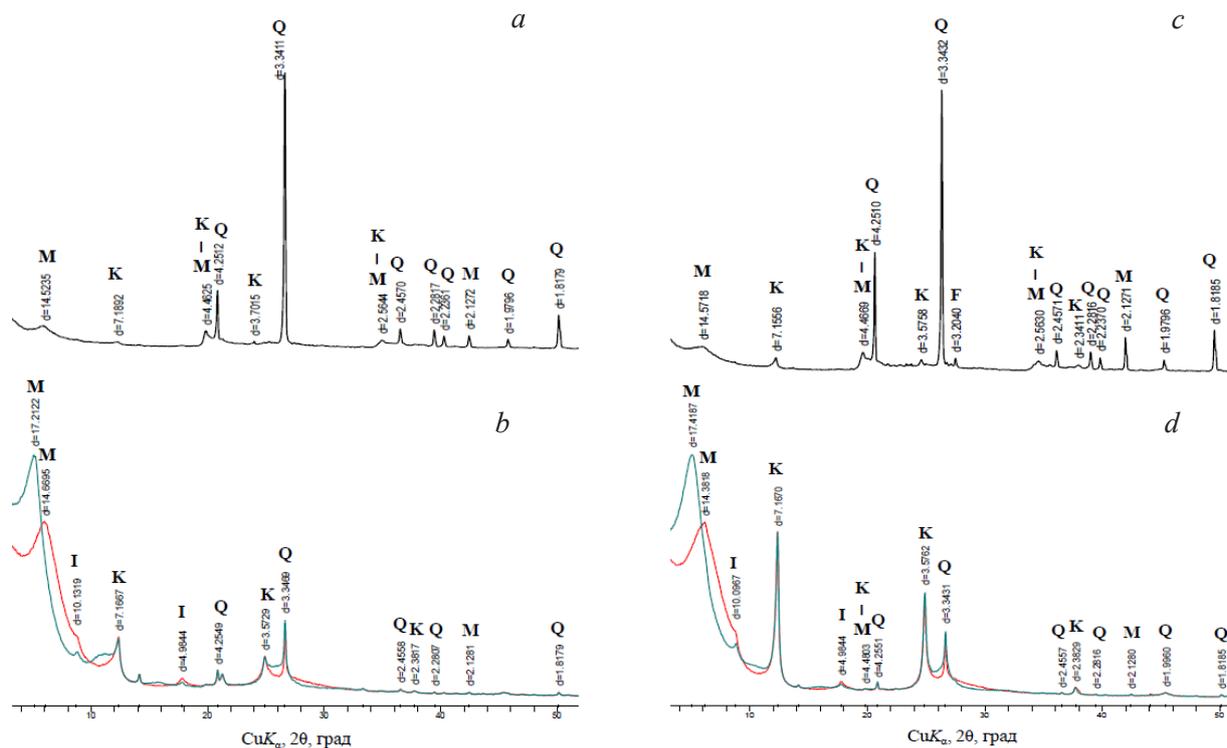


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы глин месторождений «Городное» (a, b) и «Марковское» (c, d): валовый образец (a и c) и глинистая фракция размером < 2 мкм (b и d). Красная линия – воздушно-сухой препарат, зеленая линия – препарат, насыщенный этиленгликолем. Индикаторы рефлексов отдельных минеральных фаз: М – монтмориллонит, I – иллит, К – каолинит, Q – кварц, F – калиевый полевой шпат.

Межплоскостное расстояние дано в ангстремах

Fig. 1. X-ray diffractograms of clays from Gorodnoe (a, b) and Markovskoe (c, d) deposits: a bulk sample (a and c) and its clay fraction < 2 μm in size (b and d). The red line is an air-dry preparation, the green line is a preparation saturated with ethylene glycol. Indicators of reflections of individual mineral phases: M – montmorillonite, I – illite, K – kaolinite, Q – quartz, F – potassium feldspar. Interplanar spacing is given in angstroms

Т а б л и ц а 2. Минеральный состав образцов глин

Table 2. Mineral composition of clay samples

Шифр образца	Содержание минерала, мас.%								
	монтмориллонит	иллит	каолинит	кварц	альбит	микроклин	хлорит	амфиболы	анатаз
ГГ	36,3	4,8	7,0	43,9	1,8	2,8	1,1	1,2	1,1
ГМ	37,6	3,6	14,7	34,3	2,3	6,7	< 0,1	< 0,1	0,8

Наиболее устойчивый к воздействию модельного минерализованного раствора образец глины определяли по коэффициенту фильтрации (K_f , м/сут) как для исходных природных образцов глин, так и для образцов глин после 75 дней взаимодействия с данным раствором. Значения K_f для образцов ГГ и ГМ до и после взаимодействия с модельным минерализованным раствором приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. Значения коэффициентов фильтрации для образцов глин

Table 3. Filtration coefficient values of clay samples

Шифр образца	Коэффициент фильтрации (K_f), м/сут	
	Исходный образец глины	Образец глины после взаимодействия с модельным минерализованным раствором
ГГ	$3,0 \cdot 10^{-6}$	$7,3 \cdot 10^{-6}$
ГМ	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$4,8 \cdot 10^{-6}$

Как видно из результатов, представленных в табл. 3, наиболее устойчивым к воздействию модельного минерализованного раствора оказался образец ГМ. После взаимодействия с модельным минерализованным раствором значения K_f для образцов ГГ и ГМ увеличились в 2,4 и 1,3 раза соответственно по сравнению с исходными образцами глин.

Одним из основных требований к глине в составе подстилающего экрана ПЗРО является эффективная сорбция радионуклидов [9]. Анализ литературных данных показал, что сорбция различных радионуклидов происходит на определенных природных минералах. Так, радионуклид ^{137}Cs предпочтительно сорбируется на иллите [7], а ^{90}Sr – на монтмориллоните [23]. Согласно данным [7, 9], сорбция ^{137}Cs в системе глинистый материал – раствор зависит в основном от содержания иллита и концентрации калия в растворе [7], а ^{90}Sr – от емкости катионного обмена (ЕКО), удельной поверхности и концентрации кальция в растворе [9]. Значения удельной поверхности и ЕКО для образцов глин приведены в табл. 4.

Таблица 4. Физико-химические свойства образцов глин

Table 4. Physical-chemical properties of clay samples

Шифр образца	Удельная поверхность, м ² /г	ЕКО, мг-экв/100 г
ГГ	41,1 ± 3,2	20,3 ± 1,6
ГМ	42,7 ± 2,4	24,5 ± 2,1

Согласно данным табл. 2 и 4, а также [9–11], различия в сорбции радионуклидов ^{137}Cs и ^{85}Sr из растворов образцами ГГ и ГМ должны быть незначительными, так как данные глины имеют схожий минеральный состав и близкие значения удельной поверхности и ЕКО.

Основными радионуклидами, вносящими вклад в активность очень низко-, низко- и средне-активных РАО, являются ^{137}Cs , ^{60}Co и ^{90}Sr [1]. Радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr образуются на АЭС при делении топлива на основе урана и являются основными компонентами очень низко-, низко- и короткоживущих среднеактивных РАО, удельная активность которых составляет соответственно менее 10^6 , 10^6 – 10^7 и 10^7 – 10^{10} Бк/кг, что эквивалентно концентрациям данных радионуклидов менее 10^{-9} , 10^{-9} – 10^{-8} , 10^{-8} – 10^{-5} моль/кг. Влияние модельного минерализованного раствора на сорбционные свойства образцов ГГ и ГМ описывают полученные изотермы сорбции цезия (Cs) и стронция (Sr) из бессолевого раствора (дистиллированная вода) и из модельного минерализованного раствора (pH 7,8). Исходные концентрации Cs или Sr в растворе подобраны таким образом, чтобы охватить весь диапазон активности ^{137}Cs и ^{90}Sr в составе РАО, указанный выше.

Коэффициент распределения (K_d , дм³/кг) радионуклидов для материалов физического барьера является одним из основных показателей, определяющих возможность их использования в качестве компонента подстилающего экрана ПЗРО [9]. Поэтому для удобства сравнения значений K_d при сорбции цезия и стронция из различных растворов образцами ГГ и ГМ на рис. 2 и 3 показаны изотермы сорбции в виде зависимостей K_d от равновесных концентраций цезия и стронция в растворе (C_p , моль/дм³) в билигарифмических координатах.

В [12, 24] показано, что Cs в природных водах присутствует в виде катиона Cs^+ , а Sr – в виде катиона Sr^{2+} при pH < 9 (при pH > 9 он может находиться в виде карбонатных форм), что обуславливает высокую миграционную подвижность Cs и Sr.

Как видно из рис. 2 и 3, изотермы сорбции Cs и Sr для образцов ГГ и ГМ из различных растворов имеют схожий характер, а значения K_d для Cs и Sr практически не отличаются в пределах погрешности эксперимента. Перегибы на изотермах сорбции Cs (см. рис. 2) свидетельствуют о существовании в образцах ГГ и ГМ двух типов сорбционных центров – T_1 (высокоселективные центры) и T_2 (низкоселективные центры), которые различаются не только значениями K_d , но и сорбционной емкостью по отношению к Cs. Появление высокоселективного центра T_1 в образцах ГГ и ГМ связано с наличием иллитовой фазы в структуре монтмориллонита [21], входящего в состав образцов глин. При низких концентрациях Cs^+ в растворе его сорбция проходит на центрах T_1 , которые по мере роста концентрации Cs^+ в растворе насыщаются, и в сорбции начинают участвовать центры T_2 . Для двух исследованных образцов глин рассчитанные значения K_d цезия центров T_1 и T_2 различаются на порядок и составляют $1,9 \cdot 10^4$ и $1,8 \cdot 10^3$ дм³/кг соответственно,

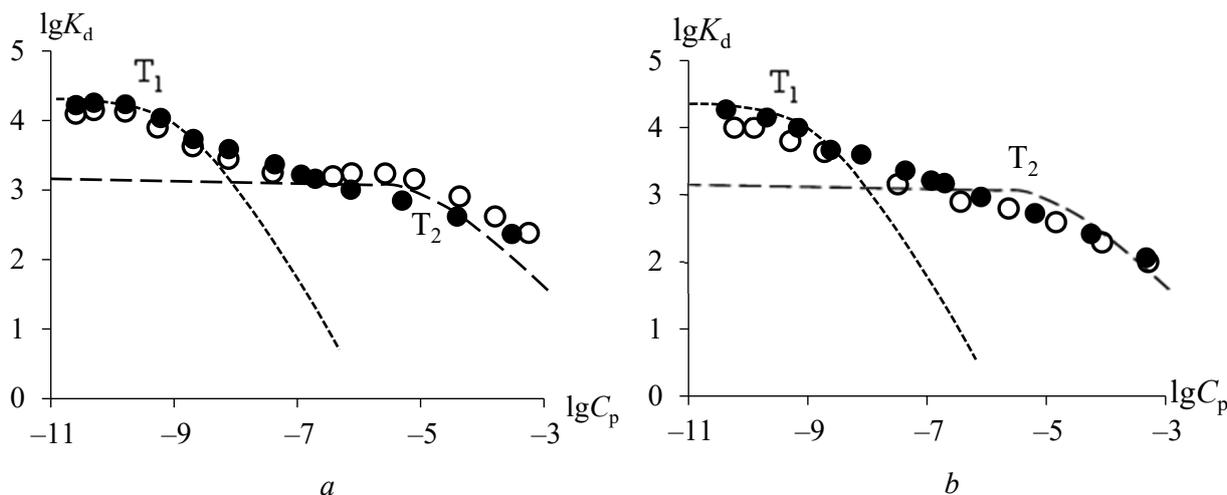


Рис. 2. Зависимость $\lg K_d(\text{Cs})$ от равновесной концентрации Cs в растворе для образцов глин месторождений «Городное» (а) и «Марковское» (b), $\text{pH } 7,8 \pm 0,1$, $[\text{глина}] = 10 \text{ г/дм}^3$; ● – изотерма сорбции Cs из дистиллированной воды, ○ – изотерма сорбции Cs из модельного минерализованного раствора

Fig. 2. Relation of $\lg K_d(\text{Cs})$ and equilibrium concentration of Cs in solution for clay samples from deposits “Gorodnoe” (a) and “Markovskoe” (b), $\text{pH } 7.8 \pm 0.1$, $[\text{clay}] = 10 \text{ g/dm}^3$; ● – Cs sorption isotherm in distilled water, ○ – Cs sorption isotherm in the model mineralized solution

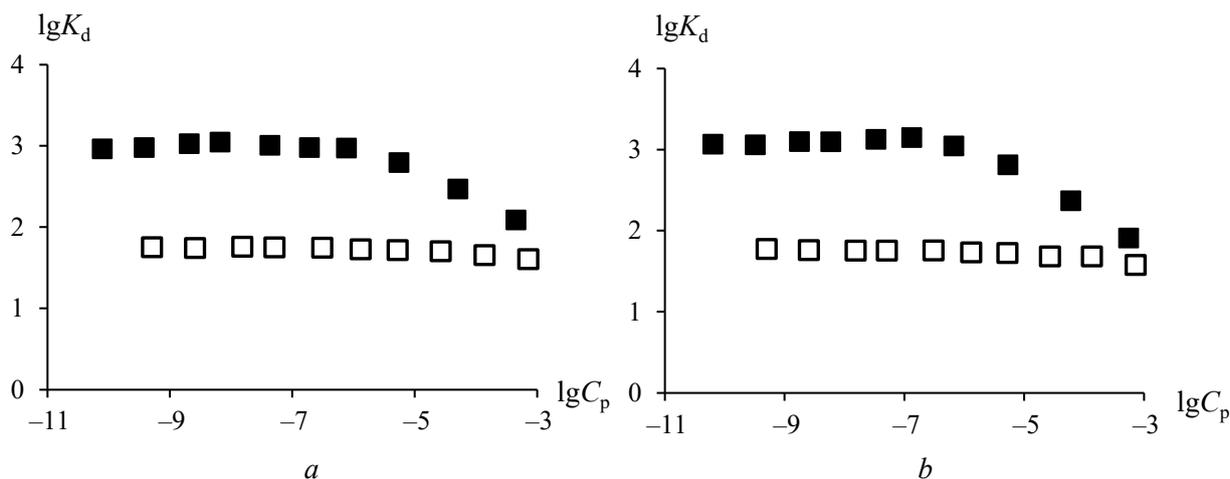


Рис. 3. Зависимость $\lg K_d(\text{Sr})$ от равновесной концентрации Sr в растворе для образцов глин месторождений «Городное» (а) и «Марковское» (b), $\text{pH } 7,8 \pm 0,1$, $[\text{глина}] = 10 \text{ г/дм}^3$; ■ – изотерма сорбции Sr из дистиллированной воды, □ – изотерма сорбции Sr из модельного минерализованного раствора

Fig. 3. Relation of $\lg K_d(\text{Sr})$ and equilibrium concentration of Sr in solution for clay samples deposits “Gorodnoe” (a) and “Markovskoe” (b), $\text{pH } = 7.8 \pm 0.1$, $[\text{clay}] = 10 \text{ g/dm}^3$; ■ – Sr sorption isotherm from distilled water, □ – Sr sorption isotherm from the model mineralized solution

а сорбционные емкости по Cs, определенные на участках постоянного значения K_d по формуле (3), составляют $3,2 \cdot 10^{-5}$ и $2,0 \cdot 10^{-2}$ моль/кг соответственно.

По способности снижать сорбцию ^{137}Cs на иллите катионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} можно расположить в следующем порядке: $\text{K}^+ > \text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ [21]. Сопоставление значений K_d Cs для образцов ГГ и ГМ из растворов (см. рис. 2) показывает, что модельный минерализованный раствор практически не оказывает влияния на сорбционные свойства глин в отношении цезия. Полученный результат можно объяснить низкой конкурентной борьбой Cs^+ с катионами модельного минерализованного раствора за места сорбции на иллите образцов ГГ и ГМ.

В [24] показано, что по способности снижать сорбцию ^{90}Sr на монтмориллоните катионы Na^+ , K^+ , Mg^{2+} и Ca^{2+} располагаются в следующем порядке: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$. Значения K_d Sr для образцов ГГ и ГМ из растворов на один-два порядка ниже соответствующих значений K_d Cs

(см. рис. 2 и 3). Это связано с относительно низкой селективностью сорбции стронция в присутствии конкурирующего катиона Ca^{2+} (химический аналог стронция), содержащегося в модельном минерализованном растворе в количестве $2,4 \text{ моль/дм}^3$, что достаточно для значительного снижения сорбции стронция на монтмориллоните образцов ГГ и ГМ [23]. Для двух исследованных образцов глин значение $K_d \text{ Sr}$ из дистиллированной воды (бессолевой раствор) и модельного минерализованного раствора составляет 1 000 и $60 \text{ дм}^3/\text{кг}$ соответственно, то есть снижается в 16,7 раза (см. рис. 3). Сорбционная емкость по стронцию для двух образцов глин, определенная на участках постоянного значения $K_d \text{ Sr}$ по формуле (3), составляет около $0,01 \text{ моль/кг}$ (см. рис. 3).

Установлено, что при исходной концентрации Cs^+ и Sr^{2+} в модельном минерализованном растворе не более $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ моль/дм}^3$ (эквивалентно удельной активности ^{137}Cs или ^{90}Sr в растворе 10^{10} Бк/дм^3) значения $K_d \text{ Cs}$ для образцов ГГ и ГМ составляют около $1,8 \cdot 10^3 \text{ дм}^3/\text{кг}$ (см. рис. 3). Значения $K_d \text{ Cs}$ более $10^3 \text{ дм}^3/\text{кг}$ для глин в модельном минерализованном растворе свидетельствуют о высоких сорбционных свойствах образцов ГГ и ГМ по отношению к цезию. В отличие от цезия $K_d \text{ Sr}$ для образцов ГГ и ГМ в модельном растворе в 30 раз ниже (см. рис. 3) и составляют примерно $60 \text{ дм}^3/\text{кг}$.

Заключение. Проведенный рентгенофазовый анализ образцов глин месторождений «Городное» (ГГ) и «Марковское» (ГМ) и их глинистых фракций с размером частиц менее 2 мкм позволил установить наличие иллитовой фазы в структуре монтмориллонита, входящего в состав данных образцов глин. Содержание иллитовой фазы в образцах ГГ и ГМ составляет 4,8 и 3,6 мас.% соответственно. В результате проведенных исследований определено, что иллитовая фаза в структуре монтмориллонита содержит высокоселективные центры сорбции ^{137}Cs , в то время как сорбция ^{85}Sr в основном осуществляется на монтмориллоните.

Показано, что модельный минерализованный раствор практически не влияет на сорбцию ^{137}Cs образцами глин, но оказывает значительное влияние на сорбцию ^{85}Sr . Коэффициенты распределения (K_d) ^{137}Cs для образцов глин из модельного минерализованного раствора составляют более $10^3 \text{ дм}^3/\text{кг}$, что свидетельствует о высоких сорбционных свойствах образцов ГГ и ГМ по отношению к ^{137}Cs . Значения $K_d \text{ }^{85}\text{Sr}$ для образцов глин при сорбции из модельного минерализованного раствора в 30 раз ниже по сравнению с $K_d \text{ }^{137}\text{Cs}$, что связано с конкуренцией стронция с ионами кальция, являющегося его аналогом. Установлено, что коэффициенты фильтрации для образцов глин ГГ и ГМ после взаимодействия с модельным минерализованным раствором возрастают в 2,4 и 1,3 раза соответственно по сравнению с исходными образцами данных глин. Наиболее устойчивой к воздействию модельного минерализованного раствора является глина месторождения «Марковское».

Таким образом, глина месторождения «Марковское» Гомельской области может быть использована в составе подстилающего экрана при строительстве пункта захоронения очень низко-, низко- и среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС, так как способна существенно снизить миграцию ^{137}Cs за пределы ПЗРО. Однако для снижения миграции радиоактивного стронция она менее эффективна.

Список использованных источников

1. Жемжуров, М. Л. Техническая концепция захоронения очень низкоактивных, низкоактивных и короткоживущих среднеактивных радиоактивных отходов Белорусской АЭС / М. Л. Жемжуров, Н. Д. Кузьмина // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 105–118. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>
2. Interactions of bentonite with metal and concrete from the FEBEX experiment: mineralogical and geochemical investigations of selected sampling sites / S. Kaufhold [et al.] // Clay Minerals. – 2018. – Vol. 53, Iss. 4. – P. 745–763. <http://doi.org/10.1180/clm.2018.54>
3. Procedures and Techniques for Closure of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste: IAEA-TECDOC-1260. – Vienna: IAEA, 2001. – 96 p.
4. Применение природных глинистых материалов для повышения уровня ядерной безопасности объектов ядерного наследия / В. В. Крупская [и др.] // Радиоактив. отходы. – 2018. – № 2 (3). – С. 30–43.
5. Шарафутдинов, Р. Б. Моделирование диффузии радионуклидов из приповерхностных хранилищ жидких РАО / Р. Б. Шарафутдинов, О. Н. Уманова, В. И. Корж // Ядер. и радиац. безопасность. – 2008. – № 1. – С. 18–25.

6. Мартынов, К. В. Деформация и фильтрация в глинистых материалах для защитных барьеров радиационно опасных объектов / К. В. Мартынов, В. О. Жаркова, Е. В. Захарова // Радиоактив. отходы. – 2021. – № 4 (17). – С. 78–88.
7. Ionic strength and pH dependent multi-site sorption of Cs onto a micaceous aquifer sediment / A. J. Fuller [et al.] // Appl. Geochem. – 2014. – Vol. 40. – P. 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.10.017>
8. Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite / C. B. Durrant [et al.] // Sci. Total Environ. – 2018. – Vols. 610–611. – P. 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.122>
9. Сорбция радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{238}U на различных природных сорбентах / В. В. Милютин [и др.] // Радиохимия. – 2021. – Т. 63, № 6. – С. 510–516. <https://doi.org/10.31857/S0033831121060022>
10. Mayordomo, N. Effects of γ -alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach / N. Mayordomo, U. Alonso, T. Missana // Appl. Geochem. – 2019. – Vol. 100. – P. 121–130. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.012>
11. Adsorption of Cs(I) and Sr(II) on Bentonites with Different Compositions at Different pH Minerals / Yu. Izosimova [et al.] // Minerals. – 2022. – Vol. 12, № 7. – Art. ID 862. <https://doi.org/10.3390/min12070862>
12. Modeling of Cs sorption in natural mixed-clay and the effects of ion competition / T. Missana [et al.] // Appl. Geochem. – 2014. – Vol. 49. – P. 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.011>
13. Мартынов, К. В. Взаимодействие надземной воды с барьерным бентонитом и фосфатным стеклом, содержащим имитаторы РАО / К. В. Мартынов, Е. В. Захарова // Вопр. радиац. безопасности. – 2019. – № 3. – С. 23–29.
14. Дерягин, Б. В. Поверхностные силы / Б. В. Дерягин, Н. В. Чуряев, В. М. Муллер. – М.: Наука, 1987. – 398 с.
15. Маковская, Н. А. Исследование сорбции ^{137}Cs и ^{85}Sr перспективными белорусскими глинами и суглинками для их использования в составе инженерных барьеров пункта захоронения радиоактивных отходов Белорусской АЭС / Н. А. Маковская, А. А. Баклай, Т. Г. Леонтьева // Атомная энергетика, ядерные и радиационные технологии XXI века: докл. VIII Междунар. конф., 23–26 июня 2020 г., г. Минск / Научное учреждение «ОИЭЯИ – Сосны». – Минск: Право и экономика, 2020. – С. 165–169.
16. I-129 Test and Research to Support Disposal Decisions / D. Kaplan [et al.]. – Westinghouse, 2000. – 55 p.
17. Dubina, E. The Phenomenon of Cement Ageing on Moist Air: Surface Chemistry, Mechanisms and Effects on Admixture Performance: dissertation / E. Dubina. – München, 2013. – 225 p.
18. Uptake of lead by Na-exchanged and Al-pillared bentonite in the presence of organic acids with different functional group / L. Perelomov [et al.] // Appl. Clay Sci. – 2016. – Vol. 119. – P. 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.004>
19. Post, J. E. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data / J. E. Post, D. L. Bish // Rev. Mineral. Geochem. – 1989. – Vol. 20, № 1. – P. 277–308. <https://doi.org/10.1201/9781482277616-24>
20. Doebelin, N. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN / N. Doebelin, R. Kleeberg // J. Appl. Crystallogr. – 2015. – Vol. 48, part 5. – P. 1573–1580. <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
21. Modeling cesium retention onto Na-, K- and Ca-smectite: Effects of ionic strength, exchange and competing cations on the determination of selectivity coefficients / T. Missana [et al.] // Geochim. Cosmochim. Acta. – 2014. – Vol. 128. – P. 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.007>
22. Белоусов, П. Е. Аналитические методы диагностики минерального состава бентонитовых глин / П. Е. Белоусов, Ю. И. Бочарникова, Н. М. Боева // Вестн. РУДН. Сер.: Инженер. исследования. – 2015. – № 4 – С. 94–101.
23. Inorganic Sorbents for Wastewater Treatment from Radioactive Contaminants / N. A. Nekrasova [et al.] // Inorganics. – 2023. – Vol. 11, № 3. – Art. ID 126. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030126>.
24. Путилина, В. С. Сорбционные процессы при загрязнении подземных вод тяжелыми металлами и радиоактивными элементами. Стронций: аналит. обзор / В. С. Путилина. И. В. Галицкая, Т. И. Юганова. – Новосибирск: ГПНТБ СО РАН, 2013. – 95 с.

References

1. Zhemzhurov M. L., Kuzmina N. D. Technical concept of disposal for very low-level, low-level and short-lived intermediate-level radioactive waste of the Belarusian NPP. *Vesti Natsyonal'noi akademii nauk Belarusi. Seriya fizika-tekhnichnykh nauk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 105–118 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-105-118>
2. Kaufhold S., Dohrmann R., Ufer K., Kober F. Interactions of bentonite with metal and concrete from the FEBEX experiment: mineralogical and geochemical investigations of selected sampling sites *Clay Minerals*, 2018, vol. 53, iss. 4, pp. 745–763. <http://doi.org/10.1180/clm.2018.54>
3. *Procedures and Techniques for Closure of Near Surface Disposal Facilities for Radioactive Waste: IAEA-TECDOC-1260*. Vienna: IAEA, 2001. 96 p.
4. Krupskaya V. V., Biryukov D. V., Belousov P. E., Lekhov V. A., Romanchuk A. Yu., Kalmykov S. N. The use of natural clay materials to increase the nuclear and radiation safety level of nuclear legacy facilities. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2018, no. 2 (3), pp. 30–43 (in Russian).
5. Sharafutdinov R. B., Umanova O. N., Korzh V. I. Radionuclide diffusion modelling in near-surface liquid radioactive waste storages. *Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost' = Nuclear and Radiation Safety*, 2008, no. 1, pp. 18–25 (in Russian).
6. Martynov K. V., Zharkova V. O., Zakharova E. V. Deformation and filtration in clay materials constituting to the safety barriers of radiation hazardous facilities. *Radioaktivnye othody = Radioactive Waste*, 2021, no. 4 (17), pp. 78–88 (in Russian).
7. Fuller A. J., Shaw S., Peacock C. L., Trivedi D., Small J. S., Abrahamsen L. G., Burke I. T. Ionic strength and pH dependent multi-site sorption of Cs onto a micaceous aquifer sediment. *Applied Geochemistry*, 2014, vol. 40, pp. 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.10.017>

8. Durrant C. B., Begg J. D., Kersting A. B. Cesium sorption reversibility and kinetics on illite, montmorillonite, and kaolinite. *Science of the Total Environment*, 2018, vols. 610–611, pp. 511–520. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.122>
9. Milyutin V. V., Nekrasova N. A., Belousov P. E., Krupskaya V. V. Sorption of Radionuclides ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, and ²³³U on Various Natural Sorbents. *Radiochemistry*, 2021, vol. 63, no. 6, pp. 741–746. <https://doi.org/10.1134/S106636221060059>
10. Mayordomo, N., Alonso U., Missana T. Effects of γ -alumina nanoparticles on strontium sorption in smectite: Additive model approach. *Applied Geochemistry*, 2019, vol. 100, pp. 121–130. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.11.012>
11. Izosimova Yu., Gurova I., Tolpeshta I., Karpukhin M., Zakusin S., Zakusina O., Samburskiy A., Krupskaya V. Adsorption of Cs(I) and Sr(II) on Bentonites with Different Compositions at Different pH. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 7, art. ID 862. <https://doi.org/10.3390/min12070862>
12. Missana T., García-Gutierrez M., Benedicto A., Ayora C., De-Pourcq K. Modeling of Cs sorption in natural mixed-clay and the effects of ion competition *Applied Geochemistry*, 2014, vol. 49, pp. 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2014.06.011>
13. Martynov K.V., Zakharova E. V. Interaction of surface water with barrier bentonite and phosphate glass containing radioactive waste imitators. *Voprosy radiatsionnoi bezopasnosti = Journal of Radiation Safety Issues*, 2019, no. 3, pp. 23–29 (in Russian).
14. Deryagin, B. V., Churaev N. V., Muller V. M. *Surface Forces*. Moscow, Nauka Publ., 1987. 398 p. (in Russian).
15. Makovskaya N. A., Baklay A. A., Leont'eva T. G. Investigation of ¹³⁷Cs and ⁸⁵Sr sorption on Belarusian clays and loams for their utilization as a part of engineering barriers in radioactive waste disposal of the Belarusian NPP. *Atomnaya energetika, yadernye i radiatsionnye tekhnologii XXI veka: doklady VIII Mezhdunarodnoi konferentsii, 23–26 iyunya 2020 g., g. Minsk* [Atomic Energy, Nuclear and Radiation Technologies of 21st Century: Reports of 8th International Conference, 23–26 June 2020, Minsk]. Minsk, The Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National of the Academy of Sciences of Belarus, 2020, pp. 165–169 (in Russian).
16. Kaplan D., Mattigod S., Parker K., Iversen D. *I-129 Test and Research to Support Disposal Decisions*. Westinghouse, 2000. 55 p.
17. Dubina E. *The Phenomenon of Cement Ageing on Moist Air: Surface Chemistry, Mechanisms and Effects on Admixture Performance*. München, 2013. 225 p.
18. Perelomov L., Sarkar B., Rahman M. M., Goryacheva A., Naidu R. Uptake of lead by Na-exchanged and Al-pillared bentonite in the presence of organic acids with different functional. *Applied Clay Science*, 2016, vol. 119, pp. 417–423. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.11.004>
19. Post J. E., Bish D. L. Rietveld refinement of crystal structures using powder X-ray diffraction data. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 1989, vol. 20, no. 1, pp. 277–308. <https://doi.org/10.1201/9781482277616-24>
20. Doebelin N., Kleeberg R. Profex: a graphical user interface for the Rietveld refinement program BGMN. *Journal of Applied Crystallography*, 2015, vol. 48, part 5, pp. 1573–1580. <https://doi.org/10.1107/S1600576715014685>
21. Missana T., Benedicto A., García-Gutierrez M., Alonso U. Modeling cesium retention onto Na-, K- and Ca-smectite: Effects of ionic strength, exchange and competing cations on the determination of selectivity coefficients. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2014, vol. 128, pp. 266–277. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.10.007>
22. Belousov P. E., Bocharnikova Yu. I., Boeva N. M. Analytical methods for diagnostic of mineral composition in bentonite clay. *Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya = RUDN Journal of Engineering Research*, 2015, no. 4, pp. 94–101 (in Russian).
23. Nekrasova N. A., Milyutin V. V., Kaptakov V. O., Kozliti E. A. Inorganic Sorbents for Wastewater Treatment from Radioactive Contaminants. *Inorganics*, 2023, vol. 11, no. 3. art. ID 126. <https://doi.org/10.3390/inorganics11030126>
24. Putilina V. S., Galitskaya I. V., Yuganova T. I. *Sorption Processes in Heavy Metal and Radioactive Elements Groundwater Pollution. Strontium: an Analytical Review*. Novosibirsk, State Public Scientific and Technical Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2013. 95 p. (in Russian).

ISSN 1561-8358 (Print)

ISSN 2524-244X (Online)

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-244-252>

УДК 621.039.7



Оригинальная статья

О. Б. Коренькова*, А. М. Зарубо, А. В. Радкевич, В. В. Торопова, Е. М. Дашук

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси,
а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь*

ВЛИЯНИЕ БОРНОЙ КИСЛОТЫ НА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ЖЕЛЕЗА (III) В ВОДНЫХ РАСТВОРАХ

Аннотация. С использованием методов ионного обмена, ультрафильтрации и центрифугирования исследовано состояние железа (III) в концентрации $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³ в водных растворах в присутствии борной кислоты в концентрации 5–20 г/дм³ в широком диапазоне pH. При помощи метода ионного обмена были установлены области существования ионных и неионных форм железа (III) в растворах с различным содержанием борной кислоты. Экспериментальные данные показали, что в присутствии борной кислоты происходит смещение pH начала коллоидообразования железа (III). При помощи методов ультрафильтрации и центрифугирования было установлено образование комплексных соединений железа (III) с полиборатными ионами в нейтральной – слабощелочной области pH. Также показано, что увеличение концентрации борной кислоты в растворе приводит к увеличению области существования предполагаемых комплексов. Выявленные особенности поведения железа (III) в растворах, содержащих борную кислоту, определяют возможность применения методов ионного обмена и мембранного разделения для очистки растворов. Информация о физико-химических свойствах металл-ионов позволит обеспечить оптимальные условия для очистки жидких радиоактивных отходов на различных объектах атомной промышленности.

Ключевые слова: продукты коррозии, жидкие радиоактивные отходы, ионный обмен, ультрафильтрация, центрифугирование

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Коренькова Ольга Борисовна* – научный сотрудник Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0009-0009-2182-3368>. E-mail: korenkova_olya@mail.ru; *Зарубо Александр Михайлович* – старший научный сотрудник Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-4454-9217>. E-mail: zarubaalex@gmail.com; *Радкевич Артем Валерьянович* – ученый секретарь Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. <https://orcid.org/0000-0003-4110-2890>. E-mail: radkevich@sosny.bas-net.by; *Торопова Валентина Владимировна* – заведующий лабораторией Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: vtoropova@sosny.bas-net.by; *Дашук Елена Михайловна* – старший научный сотрудник Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: ireplab06@mail.ru.

Вклад авторов: *Коренькова Ольга Борисовна* – сбор, анализ и обобщение литературных данных, обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), проведение экспериментального исследования по изучению состояния железа (III) в водных растворах, содержащих борную кислоту в концентрации 0–16 г/дм³ методами ионного обмена, ультрафильтрации и центрифугирования, обобщение результатов исследования, формулировка выводов, интерпретация результатов исследования, написание текста рукописи, редактирование текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом; *Зарубо Александр Михайлович* – проведение экспериментального исследования по изучению состояния железа (III) в водных растворах, содержащих борную кислоту в концентрации 20 г/дм³, методами ультрафильтрации и центрифугирования, а также состояния железа (III) в растворах нитрата калия и дистиллированной воде, построение количественного распределения форм борной кислоты от значения pH раствора, построение соотношения количества триборат-иона и тетраборат-иона в зависимости от концентрации борной кислоты в растворе; *Радкевич Артем Валерьянович* – обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач), интерпретация результатов исследования, формулировка выводов, редактирование текста рукописи, критический пересмотр текста рукописи; *Торопова Валентина Владимировна* – критический пересмотр текста рукописи; *Дашук Елена Михайловна* – сбор, анализ и обобщение литературных данных, редактирование текста рукописи.

* Corresponding author / Автор, ответственный за переписку.

Для цитирования: Влияние борной кислоты на физико-химическое состояние железа (III) в водных растворах / О. Б. Коренькова [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69 № 3. – С. 244–252. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-244-252>

Поступила в редакцию: 02.04.2024

Доработанный вариант: 24.07.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article

Olga B. Korenkova*, Aliaksandr M. Zaruba, Artsiom V. Radkevich, Valentina V. Toropova, Elena M. Dashouk

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus,
P. O. Box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus*

INFLUENCE OF BORIC ACID ON THE SPECIATION OF IRON (III) IN AQUEOUS SOLUTIONS

Abstract. During the work, the speciation of iron (III) was studied at the concentration of $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ mol/dm³ in aqueous solutions in the presence of boric acid at a concentration of 5–20 g/dm³ in a wide pH range using ion exchange, ultrafiltration and centrifugation methods. The regions of existence of ionic and nonionic forms of iron (III) were determined by ion exchange in solutions with different boric acid concentrations. Experimental data have shown that the pH of the onset of iron (III) colloid formation shifts in the presence of boric acid. The formation of complex compounds of iron (III) with polyborate ions in the neutral – slightly alkaline pH region was established by ultrafiltration and centrifugation. As shown in the paper, the increase in the concentration of boric acid in solution leads to the increase in the region of existence of the supposed complexes. The identified features of the behavior of iron (III) in solutions containing boric acid determine the possibility of using ion exchange and membrane separation methods for purifying solutions. Information about the physical-chemical properties of various metal-ions can provide optimal conditions for the purification of liquid radioactive waste at various nuclear industry facilities.

Key words: corrosion products, liquid radioactive wastes, ion exchange, ultrafiltration, centrifugation

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

Information about the authors: *Olga B. Korenkova* – Researcher at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0009-0009-2182-3368>. E-mail: korenkova_olya@mail.ru; *Aliaksandr M. Zaruba* – Senior Researcher at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4454-9217>. E-mail: zarubaalex@gmail.com; *Artsiom V. Radkevich* – Scientific Secretary at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. <https://orcid.org/0000-0003-4110-2890>. E-mail: radkevich@sosny.bas-net.by; *Valentina V. Toropova* – Head of the Laboratory at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: vtoropova@sosny.bas-net.by; *Elena M. Dashouk* – Senior Researcher at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: ireplab06@mail.ru.

Contribution of the authors: *Olga B. Korenkova* – collection and analysis of literature data; justification of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), conducting the experimental study of the state of iron (III) in aqueous solutions containing boric acid in a concentration of 0–16 g/dm³ using ion exchange, ultrafiltration and centrifugation methods, generalization of research results, formulation of conclusions, interpretation of research results, writing the text of the manuscript, editing the manuscript text, manuscript design, working with graphic material; *Aliaksandr M. Zaruba* – the study of the iron (III) state in aqueous solutions containing boric acid at the concentration of 20 g/dm³ by ultrafiltration and centrifugation methods, as well as the state of iron (III) in solutions of potassium nitrate and distilled water, constructing a quantitative distribution of boric acid forms depending on the pH value of the solution, constructing the ratio of the amount of triborate ion and tetraborate ion depending on the concentration of boric acid in the solution; *Artsiom V. Radkevich* – justification of the research concept (formulation of ideas, research goals and objectives), interpretation of research results, formulation of conclusions, editing the text of the manuscript, critical revision of the manuscript text; *Valentina V. Toropova* – critical revision of the manuscript text; *Elena M. Dashouk* – analysis and collecting literature data, editing the manuscript text.

For citation: Korenkova O. B., Zaruba A. M., Radkevich A. V., Toropova V. V., Dashouk E. M. Influence of boric acid on the speciation of iron (III) in aqueous solutions. *Vesti Natsyonal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-tekhnichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2024, vol. 69, no. 3, pp. 244–252 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-244-252>

Received: 02.04.2024

Modified: 24.07.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press 24.09.2024

Введение. Атомные электростанции (АЭС) являются устойчивым и высокоэффективным источником электроэнергии, однако существует несколько весомых недостатков, связанных с их эксплуатацией. Один из них – производство большого количества радиоактивных отходов (РАО) различной активности [1]. Особое место занимают жидкие радиоактивные отходы (ЖРО), поскольку

они преваляют в производственных отходах и требуют более высокого уровня технологического обеспечения и научно-технической поддержки при обращении с ними [2].

Перспективы и масштабы дальнейшего развития атомной энергетики и промышленности во многом зависят от решения проблемы обращения с ЖРО, поскольку они представляют основную потенциальную опасность для населения и окружающей среды. Одним из способов минимизации объемов РАО, в том числе и ЖРО, является их переработка. Создание эффективных методов очистки жидких радиоактивных сред (трапных вод, теплоносителя первого контура и т. д.) основывается на знании форм нахождения (физико-химического состояния) радионуклидов в различных растворах (водных, органических, смешанных). Формы нахождения, в свою очередь, зависят от таких факторов, как значение pH, наличие окислителей и восстановителей, комплексообразователей, а также их концентрации в растворах. В качестве фактора также может выступать присутствие в ЖРО продуктов коррозии, которые образуются в результате эрозионно-коррозионного износа материалов оборудования и трубопроводов первого контура.

Продукты коррозии в большинстве своем представляют шпинели нестехиометрического магнетита, которые находятся в теплоносителе в дисперсном состоянии [3]. Радионуклиды могут адсорбироваться коррозионными частицами и мигрировать по первому контуру. Это приводит к образованию высокоактивных отложений на различных участках оборудования и трубопроводов первого контура [3–5].

Концентрация железа в технологических средах АЭС (теплоноситель первого контура, промывочные воды, вода бассейна выдержки отработавшего топлива, водные среды вспомогательных систем и т. д.) является одним из диагностических показателей качества водно-химического режима первого контура¹. Данные показатели дополнительно информируют персонал АЭС о правильности поддержания водно-химического режима и предназначены для определения причин возможных отклонений нормируемых показателей от установленных значений².

Физико-химическое состояние микроколичеств железа (III) подробно описано в литературе [6–8]. Так, в [7] показано, что в интервале pH от 1,0 до 1,5 Fe(III) в концентрации $\sim 10^{-7}$ моль/дм³ находится в растворе в форме гидратированного иона $\text{Fe}(\text{H}_2\text{O})_6^{3+}$. В интервале pH от 1,5 до 3,5 начинается гидролиз Fe^{3+} -катионов с образованием моноядерных гидроксокомплексов, а при $\text{pH} \geq 3,5$ Fe(III) в водных растворах находится в неионном (коллоидном) состоянии.

В [8] представлены результаты спектрофотометрического исследования растворов перхлората железа (III) при концентрации $\text{Fe}^{+3} 2,5 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³ (ионная сила растворов составляла 0,1 моль/дм³). Авторы работы составили модель равновесий, протекающих в изучаемой системе, и, согласно приведенным данным, значение первой константы гидролиза pK составляет $2,16 \pm 0,19$. Также в работе указано, что в изученных растворах в интервале pH от 1,0 до 1,5 присутствуют гидратированные ионы Fe^{3+} и небольшое количество моноядерных гидроксокомплексов FeOH^{2+} (около 10 %), а при дальнейшем увеличении pH в описанной системе происходит формирование биядерных комплексов состава $\text{Fe}_2(\text{OH})_4^{2+}$.

Следует отметить, что ЖРО, образующиеся на АЭС, содержат также борную кислоту, которая используется для регулирования мощности на АЭС с реакторами типов ВВЭР или PWR [9]. Концентрация борной кислоты в первом контуре зависит от реактивности реактора и поддерживается в соответствии с требованиями технического регламента безопасной эксплуатации энергоблока. В СТО 1.1.1.03.004.0980-2014 указано, что при работе реакторной установки ВВЭР-1200 на мощности концентрация борной кислоты в теплоносителе первого контура составляет 0–12 г/дм³, в то время как в стояночных режимах, включая перегрузку топлива, концентрация борной кислоты в теплоносителе поддерживается в интервале 16–20 г/дм³.

Отличительной особенностью борной кислоты является образование полиборат-ионов в концентрированных растворах. С помощью программы CHEAQS Next³, предназначенной для расчета

¹ Водно-химический режим первого контура при вводе энергоблока атомной электростанции проекта АЭС-2006 в эксплуатацию. Нормы качества теплоносителя и средства их обеспечения: СТО 1.1.1.03.004.0980-2014. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293738/4293738242.pdf> (дата обращения: 08.02.2024).

² Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Водно-химический режим атомных станций»: РБ-002-16: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 23 авг. 2016 г. № 350. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4293752/4293752457.pdf> (дата обращения: 08.02.2024).

³ CHEAQS Next. URL: <https://www.cheaqs.eu/> (дата обращения: 08.02.2024).

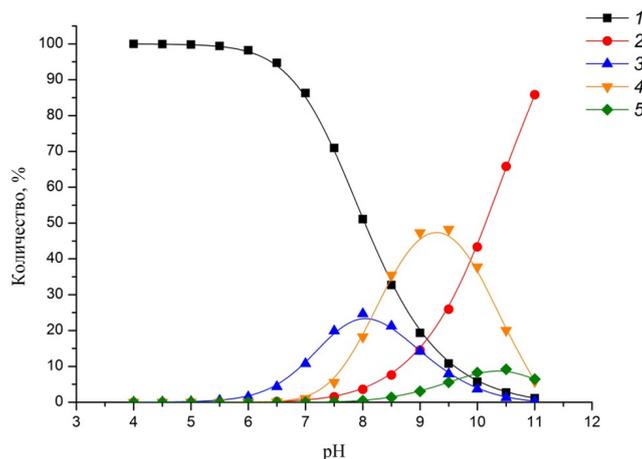


Рис. 1. Количественное распределение форм борной кислоты (кривая 1 – B(OH)_3 , кривая 2 – B(OH)_4^- , кривая 3 – $[\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_4]_4^-$, кривая 4 – $[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4]_2^-$, кривая 5 – $[\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_5]_2^-$) в зависимости от pH раствора при 20 °C; концентрация борной кислоты равна 20 г/дм³

Fig. 1. Quantitative distribution of boric acid forms (curve 1 – B(OH)_3 , curve 2 – B(OH)_4^- , curve 3 – $[\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_4]_4^-$, curve 4 – $[\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4]_2^-$, curve 5 – $[\text{B}_3\text{O}_3(\text{OH})_5]_2^-$) according to the pH value of the solution at 20 °C, boric acid concentration is 20 g/dm³

химических равновесий в водных системах, было построено количественное распределение форм борной кислоты в зависимости от значения pH раствора при 20 °C и концентрации борной кислоты 20 г/дм³ (рис. 1).

Согласно [10], полиядерные формы борной кислоты начинают образовываться в растворе с концентрацией 1 г/дм³, при этом с увеличением концентрации возрастает доля полиядерных форм борной кислоты в растворе. На рис. 2 показано изменение соотношения триборат-иона (рис. 2, a) и тетраборат-иона (рис. 2, b) в зависимости от увеличения концентрации борной кислоты с 5 по 16 г/дм³. Графики построены при помощи программы CHEAQS Next согласно константам устойчивости форм борной кислоты, взятым из базы данных NIST Standard Reference Database 84¹.

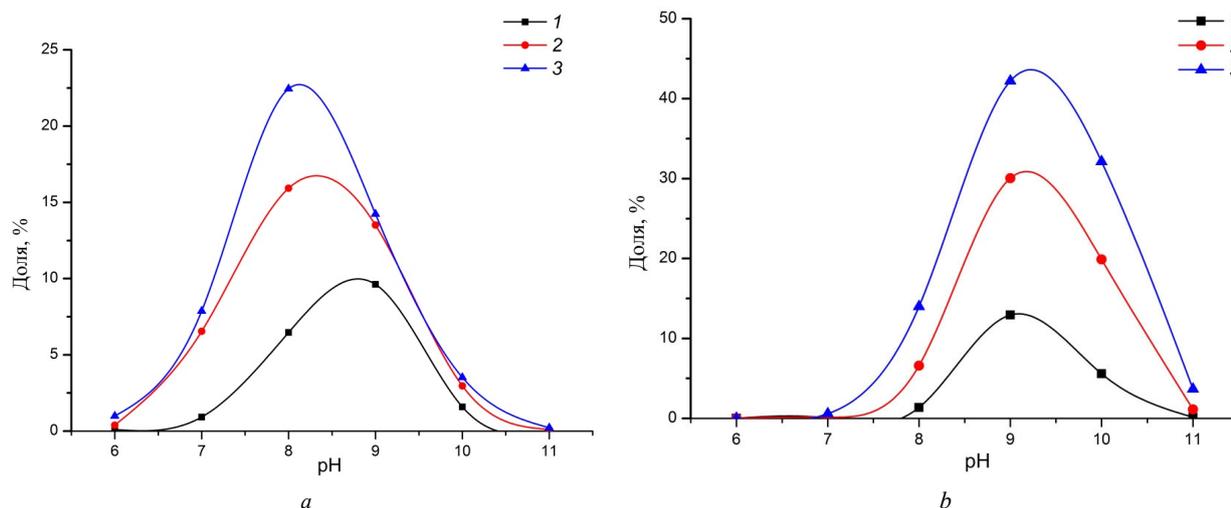


Рис. 2. Количественное распределение триборат-иона (a) и тетраборат-иона (b) в зависимости от pH раствора, где кривая 1 – концентрация борной кислоты 5 г/дм³, кривая 2 – концентрация борной кислоты 10 г/дм³, кривая 3 – концентрация борной кислоты 16 г/дм³

Fig. 2. Quantitative distribution of polynuclear forms of boric acid (a – triborate ion, b – tetraborate ion) on the pH value of the solution: curve 1 – the concentration of boric acid 5 g/dm³, curve 2 – the concentration of boric acid 10 g/dm³, curve 3 – the concentration of boric acid 16 g/dm³

¹ NIST Standard Reference Database 84. URL: <https://www.nist.gov/srd/nist-standard-reference-database-84> (дата обращения: 08.02.2024).

Полибораты могуць образовываць комплексныя злучэнні з метал-іонамі або ўплываць на працэс гідроліза, змяняючы тым самым іх стан у водных растворах. У [11–14] вывучана ўплывае борнай кіслоты ў высокіх канцэнтрацыях на фізіка-хімічнае становішча метал-іонаў нікеля, цінка, кобальта і рутенія. Пасколькі канцэнтрацыя жалеза ў ЖРО на парадкі раз вышэй канцэнтрацыі радыонуклідаў, борная кіслота, ўплываючы на фізіка-хімічнае становішча жалеза, можа косвенна оказываць ўплывае і на становішча радыонуклідаў ў ЖРО.

Целью даннай работы было вывучэнне ўплывае борнай кіслоты ў рознай канцэнтрацыі на фізіка-хімічнае становішча Fe(III) ў канцэнтрацыі $1 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³ ў водных растворах.

Метадыка эксперымента. У ходзе вывучэння вывучаліся растворы Fe(NO₃)₃ ў канцэнтрацыі $\sim 1 \cdot 10^{-5}$ моль/дм³ ў азотнай кіслоте з канцэнтрацыяй 0,1 моль/дм³ ў прысутствіі борнай кіслоты ў канцэнтрацыі 5–20 г/дм³ ў інтэрвале рН ад 1,1 да 11,0. Вывучэнне праводзілася метадамі іоннага абмену, ультрафільтрацыі і цэнтрыфугавання.

У эксперыментах па іоннаму абмену вывучаліся катыоніт Resinex KW-8 ў K⁺-форме і аніоніт Resinex A4 ў NO₃⁻- і BO₃³⁻-формах. К навеске смолы прылівалі 50 см³ рабочага раствора ($V/m \sim 3000$ см³/г), перемешивали на лабораторным встряхивателе в течение 1 сут со скоростью 200 об/мин, после чего проводили измерение концентрации железа в аликвоте раствора. Коэффициент распределения (K_d , см³/г) жалеза (III) на іонаобменных смолах вызначалі па ўраўненню

$$K_d = \frac{C_0 - C_i}{C_i} \cdot \frac{V}{m}, \quad (1)$$

дзе C_0 і C_i – канцэнтрацыя жалеза ў пачатковым і i -м зразках адпаведна, мг/дм³; V – аб’ём раствора, см³; m – маса іоніта, г. Падрыхтоўка іонітаў к эксперыментам праводзілася ў адпаведнасці з метадыкай, апісанай ў [15].

У эксперыментах па ультрафільтрацыі вывучаліся ячэйку Millipore 8200 з ультрафільтрацыйнымі мембранамі з рэгенеріраванай целюлозы. Прыклад адсячэння мембран складае 1 і 10 кДа. Прыклад адсячэння 1 кДа даннай мембраны арыентацыйна адпавядае памеру пар 1 нм, у тое ж час прыклад адсячэння 10 кДа арыентацыйна адпавядае памеру пар 2,6 нм [16]. Вывучаемы раствор аб’ёмам 125 см³ фільтравалі пад ціскам 3 бар. У эксперыментах па цэнтрыфугаванню вывучаліся лабараторную цэнтрыфугу ОПн-8. Вывучаліся цэнтрыфугаванне чатырох зразкаў раствора аб’ёмам 25 см³ кожны. Скорасць вярчэння цэнтрыфугі складала 8000 об/мин, час вярчэння – 30 мин. Падобныя ўмовы дазваляюць асадыць частыцы памерам больш 50 нм [17]. Колькасць жалеза, задыржываемага ультрафільтрацыйнай мембранай (R) або асадженага пад дзеяннем цэнтробежных сіл (S), разлічвалі па ўраўненню

$$R \text{ (или } S) = \frac{(C_0 - C_i)}{C_0} \cdot 100 \%. \quad (2)$$

Вывучэнне канцэнтрацыі Fe(III) ў вывучаемых растворах праводзілі спектэфотаметрычным метадам з вывучэннем сульфасаліцылавой кіслоты ў адпаведнасці з ГОСТ 4011–72¹.

Результаты і іх абсуджэнне. Усе прадставленыя данныя атрыманы ўсярэднім трох-пяці рэзультатаў вывучэнняў. На рыс. 3 прадставлены данныя па іоннаму абмену Fe(III) на катыоніце ў вывучаемых водных растворах, змяшчаючых борную кіслоту ў канцэнтрацыі 0–16 г/дм³. Слэдуе адзначыць, што іонны абмен на аніоніце прыходзіў у незначытэльнай ступені ў ўсім дыяпазоне рН ў ўсіх вывучаемых растворах.

Крывая 1 на рыс. 3 паказывае, што ў растворах ў адсутствіі борнай кіслоты ў інтэрвале рН ад 1,0 да 3,2 Fe(III) знаходзіцца ў растворе ў катыоннай форме. Далее, ў інтэрвале рН ад 3,2 да 4,3, прыходзіць рэзкае змяншэнне значэнняў каэфіцыента распаўсюлення жалеза на катыоніце, а пры рН > 4,3 сорбцыя на катыоніце становіцца раўнай нулю, што паказвае на поўны пераход Fe(III) ў нейоннае становішча. Атрыманыя рэзультаты добра сагласуюцца з даннымі, прадставленымі ў [6, 7].

¹ Вода питьевая. Методы вывучэння масавай канцэнтрацыі агульнага жалеза: ГОСТ 4011–72. М.: ИПК изд-во стандартов, 2008. 7 с. URL: <https://meganorm.ru/Data2/1/4294850/4294850722.pdf> (дата абрашэння: 08.02.2024).

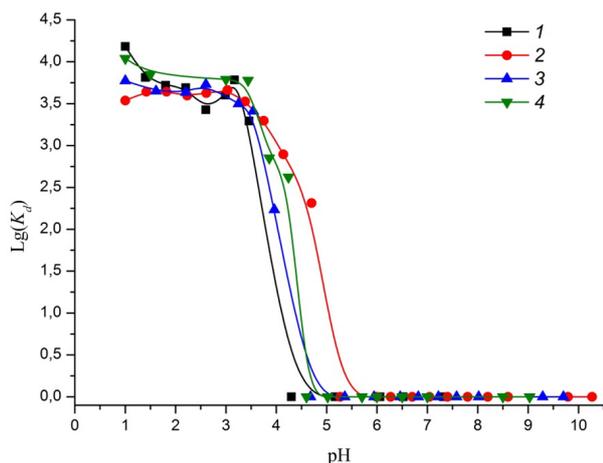


Рис. 3. Коэффициент распределения Fe(III) на катионите как функция от значения pH раствора в присутствии борной кислоты в концентрации, г/дм³: кривая 1 – 0; кривая 2 – 5; кривая 3 – 10; кривая 4 – 16

Fig. 3. Distribution coefficient of Fe(III) on the cation exchanger as a function of the pH value of the solution in the presence of boric acid in concentration, g/dm³: curve 1 – 0; curve 2 – 5; curve 3 – 10; curve 4 – 16

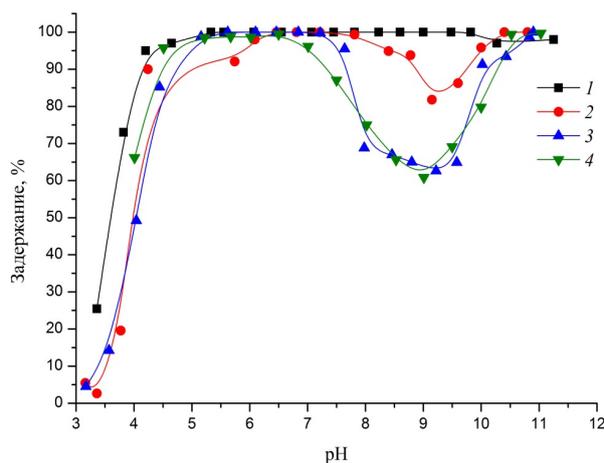


Рис. 4. Задержание Fe(III) ультрафильтрационной мембраной с пределом отсека 10 кДа как функция от значения pH раствора в присутствии борной кислоты в концентрации, г/дм³: кривая 1 – 5; кривая 2 – 10; кривая 3 – 16; кривая 4 – 20

Fig. 4. Retention of Fe(III) by the ultrafiltration membrane with a cut limit 10 kDa as a function of the pH value of the solution in the presence of boric acid in concentration, g/dm³: curve 1 – 5; curve 2 – 10; curve 3 – 16; curve 4 – 20

При добавлении в изучаемые растворы борной кислоты, начиная с концентрации 5 г/дм³, происходит смещение pH начала коллоидообразования в область нейтральных значений (со значения pH 4,3 по pH 5,3). Увеличение концентрации борной кислоты с 5 по 16 г/дм³ не приводит к существенным изменениям коэффициента распределения Fe(III) на используемых ионообменных смолах.

В ходе работы растворы, не содержащие борную кислоту, подвергались ультрафильтрации при помощи мембран с пределом отсека 1 и 10 кДа. Экспериментальные данные показали, что при pH $\geq 4,0$ железо полностью задерживается данными мембранами. Таким образом, при pH $\geq 4,0$ в растворах в отсутствие борной кислоты коллоидные частицы железа (III) имеют размер более 10 кДа.

Ультрафильтрация растворов, содержащих борную кислоту в концентрации 5–16 г/дм³, на мембране с пределом отсека 1 кДа показала, что во всех исследуемых растворах железо (III) полностью задерживается, начиная с pH = 4,2. Данные, полученные при ультрафильтрации растворов, содержащих борную кислоту в различной концентрации, на ультрафильтрационной мембране с пределом отсека 10 кДа, представлены на рис. 4.

Установлено, что добавление в исследуемые растворы борной кислоты в концентрации 5 г/дм³ не приводит к каким-либо изменениям в состоянии Fe(III). При увеличении концентрации борной кислоты до 10 г/дм³ происходит незначительное смещение начала задержания Fe(III) при ультрафильтрации, а в интервале pH от 8,4 до 10,0 наблюдается уменьшение задержания Fe(III) ультрафильтрационной мембраной. Авторы предполагают, что наблюдаемый эффект обусловлен уменьшением размера коллоидных частиц железа за счет образования комплексных соединений Fe(III) с полиборатными ионами. Причем увеличение концентрации борной кислоты до 16 и далее до 20 г/дм³ приводит к расширению области существования данных комплексных соединений и увеличению их количества, поскольку с ростом концентрации борной кислоты происходит увеличение количества триборат- и тетраборат-ионов (см. рис. 2).

На рис. 5 представлены результаты экспериментов по центрифугированию исследуемых растворов.

Эксперимент по центрифугированию растворов Fe(III) показал, что в интервале pH от 1,1 до 3,0 Fe(III) в водных растворах находится в ионной форме. Далее в интервале pH от 3,0 до 4,2 происходит образование коллоидных частиц железа, размер которых превышает 50 нм, и при pH $\geq 4,2$ количество таких частиц достигает практически 100 %.

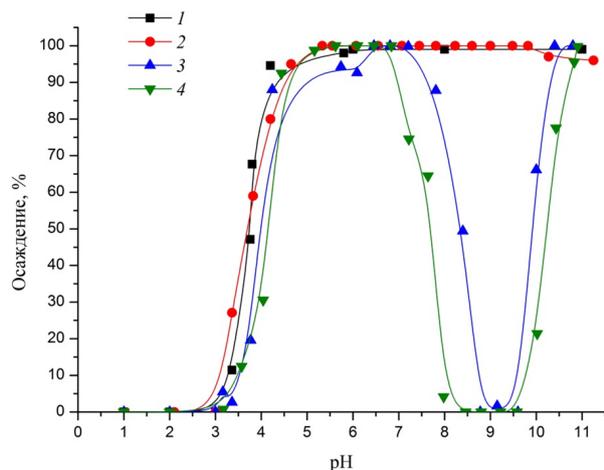


Рис. 5. Зависимость осаждения Fe(III) при центрифугировании от значения pH раствора в присутствии борной кислоты в концентрации, г/дм³: кривая 1 – 0; кривая 2 – 5; кривая 3 – 10; кривая 4 – 16

Fig. 5. Precipitation of Fe(III) as a function of the pH value of the solution in the presence of boric acid in concentration, g/dm³: curve 1 – 0; curve 2 – 5; curve 3 – 10; curve 4 – 16

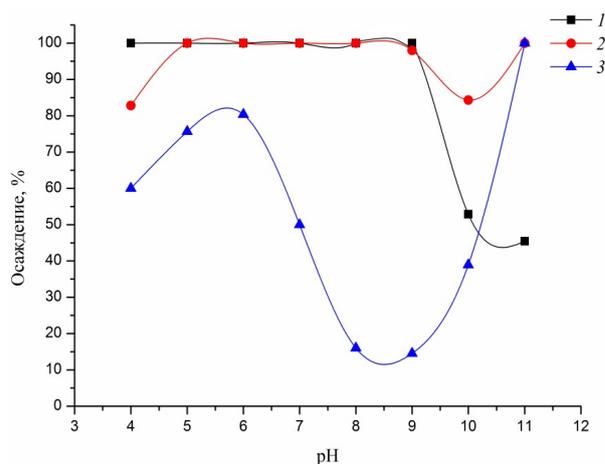


Рис. 6. Зависимость осаждения Fe(III) при центрифугировании от значения pH в различных средах: кривая 1 – дистиллированная вода; кривая 2 – раствор нитрата калия 0,1 моль/дм³; кривая 3 – раствор борной кислоты концентрацией 20 г/дм³

Fig. 6. Precipitation of Fe(III) as a function of the pH value in various media: curve 1 – distilled water; curve 2 – 0,1 mol/dm³ potassium nitrate solution; curve 3 – solution of boric acid with a concentration of 20 g/dm³

Добавление в исследуемые растворы борной кислоты в концентрации 5 г/дм³ не приводит к каким-либо изменениям в состоянии Fe(III). При увеличении концентрации борной кислоты до 10 г/дм³ в интервале pH от 7,8 до 10,4 наблюдается уменьшение осаждения Fe(III) под действием центробежной силы, что, как и в эксперименте по ультрафильтрации, может указывать на образование комплексных соединений Fe(III) с полиборатными ионами. Дальнейшее увеличение концентрации борной кислоты до 16 г/дм³ приводит к расширению области существования комплексных соединений Fe(III) и полиборатных ионов (интервал pH от 6,8 до 10,8).

Дополнительно методом центрифугирования авторами исследовано влияние среды (ионной силы раствора) на состояние Fe(III) в исследуемом интервале pH. Были изучены растворы Fe(III) в растворе борной кислоты концентрацией 20 г/дм³, растворе нитрата калия концентрацией 0,1 моль/дм³ и в дистиллированной воде (рис. 6).

В таблице приведены рассчитанные значения ионной силы растворов 0,1 моль/дм³ нитрата калия, 20 г/дм³ борной кислоты и дистиллированной воды.

pH	Значение ионной силы раствора		
	0,1 моль/дм ³ KNO ₃	20 г/дм ³ H ₃ BO ₃	дистиллированная вода
7	0,1	0,009	5,01·10 ⁻⁵
8	0,1	0,050	5,05·10 ⁻⁵
9	0,1	0,114	5,51·10 ⁻⁵
10	0,1	0,150	1,01·10 ⁻⁴

Полученные результаты показывают, что изменение ионной силы растворов не коррелирует со степенью осаждения Fe(III) при центрифугировании. Существенное влияние на дисперсное состояние Fe(III) в растворах в интервале pH 6–10 оказывает борная кислота, что, вероятно, связано с образованием комплексных соединений с полиборатами и частичным разрушением гидроксокомплексов металл-иона.

Заключение. В ходе работы было изучено состояние Fe(III) в растворах, содержащих борную кислоту в концентрации 5–20 г/дм³, в широком интервале pH тремя независимыми методами. При помощи метода ионного обмена были установлены области существования ионных и неионных форм Fe(III).

Экспериментальные данные показали, что добавление в исследуемые растворы борной кислоты в концентрации 5 г/дм^3 влечет за собой смещение рН начала коллоидообразования железа(III) со значения 4,3 до 5,3. Увеличение концентрации борной кислоты не приводит к каким-либо изменениям в распределении Fe(III) на используемых ионообменных смолах.

При помощи методов ультрафильтрации и центрифугирования установлено образование комплексных соединений железа (III) с полиборатными ионами в растворах, содержащих борную кислоту в концентрации более 10 г/дм^3 , в интервале рН от 7,8 до 10,0. Увеличение концентрации борной кислоты (до 16 и 20 г/дм^3) обуславливает увеличение области существования образующихся комплексных соединений.

Полученные результаты по исследованию физико-химического состояния железа (III) в растворах, моделирующих жидкие радиоактивные среды АЭС, показывают, что состав водной среды (наличие и концентрация борной кислоты, а также значение рН раствора) оказывает влияние на состояние Fe(III). Коллоидные формы Fe(III) могут сорбировать радионуклиды, тем самым влияя на их состояние в ЖРО или водных средах АЭС. А это, в свою очередь, может сказаться на выборе метода очистки растворов от радионуклидов.

Если рассматривать ионный обмен в качестве метода очистки ЖРО, содержащих гидроксокомплексы железа (III), то используемые в данной работе ионообменные смолы (Resinex KW-8 в K^+ -форме и анионит Resinex A4 в BO_3^{3-} -форме) не селективны по отношению к гидроксокомплексам железа (III) в растворах, содержащих борную кислоту, при характерном для ЖРО рН 6,0–9,0. Тогда как в области рН 1,1–3,5 метод ионного обмена достаточно эффективен для извлечения железа (III) из водных растворов, содержащих борную кислоту – коэффициент распределения Fe(III) в растворах борной кислоты с концентрацией $5\text{--}16 \text{ г/дм}^3$ составляет $10^3\text{--}10^4 \text{ см}^3/\text{г}$.

Метод ультрафильтрации на мембране с пределом отсечения 1 кДа применим для очистки ЖРО, содержащих железо и борную кислоту в любой концентрации, при рН > 4 . Ультрафильтрация на мембране с пределом отсечения 10 кДа эффективна для очистки растворов, содержащих железо и борную кислоту в концентрации $\leq 5 \text{ г/дм}^3$, при рН > 4 . В случае ЖРО, имеющих в составе борную кислоту в концентрации более 5 г/дм^3 , диапазон рН раствора ограничивается областью рН 4,5–7,2. При дальнейшем увеличении рН в растворах происходит образование комплексных соединений Fe(III) с полиборатными ионами, которые не задерживаются при ультрафильтрации, что приводит к снижению эффективности очистки ЖРО данным методом.

Центрифугирование в качестве метода очистки применимо для очистки ЖРО, содержащих железо (III) и борную кислоту в концентрации до 5 г/дм^3 и имеющих рН $> 4,2$. В случае растворов, содержащих борную кислоту в концентрации более 5 г/дм^3 , данный метод применим для очистки ЖРО со значением рН от 4,4 до 6,8. Как и в случае ультрафильтрации, образование комплексных соединений Fe(III) с полиборатными ионами в растворах со значением рН $> 6,8$ приводит к снижению эффективности очистки данным методом.

Полученные результаты представляются важными для понимания поведения металл-ионов в технологических средах и жидких радиоактивных отходах АЭС с реакторами с водой под давлением. Как показано в настоящей работе, присутствие борной кислоты существенно снижает возможности широко применяемых в спецводоочистке ионообменных и фильтрационных методов по отношению к различным металл-ионам, причем данный эффект проявляется именно в нейтральной области рН 6,0–10,0, характерной для большинства водных сред АЭС.

Список используемых источников

1. Хвостова, М. С. Обращение с радиоактивными отходами на предприятиях атомной отрасли / М. С. Хвостова // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер.: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2013. – № 1. – С. 97–106.
2. Муратов, О. Э. Методы переработки жидких радиоактивных отходов (аналитический обзор) / О. Э. Муратов, И. К. Степанов, С. М. Царева // Экология промышленного производства. – 2012. – № 3. – С. 30–43.
3. Поведение продуктов коррозии в первом контуре ЯЭУ с водным теплоносителем / Б. В. Гусев [и др.] // Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 4, Физика. Химия. – 2012. – Вып. 4. – С. 110–118.
4. Влияние эксплуатационных и водно-химических параметров на отложения продуктов коррозии на теплообменниках АЭС с ВВЭР / В. Г. Крицкий [и др.] // Теплоэнергетика. – 2011. – № 7. – С. 7–12.
5. Киров, В. С. Атомные электрические станции: учеб. пособие / В. С. Киров. – Одесса: ОНПУ, 2010. – 216 с.
6. Старик, И. Е. Основы радиохимии / И. Е. Старик. – М.: Наука, 1969. – 648 с.

7. Давыдов, Ю. П. Формы нахождения металл-ионов (радионуклидов) в растворах / Ю. П. Давыдов, Д. Ю. Давыдов. – Минск: Беларус. навука, 2011. – 301 с.
8. Перевошикова, Н. Б. К вопросу о гидролизе ионов железа (III) в водных растворах / Н. Б. Перевошикова, В. И. Корнев // Вестн. Удмурт. ун-та. Сер. Физика и химия. – 2006. – № 8. – С. 189–198.
9. Влияние коррекционной химической обработки теплоносителя первого контура и рабочих сред второго контура АЭС с ВВЭР, PWR на радиационную безопасность / Т. В. Мальцева [и др.] // Ядерна та радіацыйна безпека. – 2012. – № 4. – С. 37–43.
10. Kabay, N. Boron Separation Processes / N. Kabay, N. Hilal, M. Bryjak. – Elsevier Inc., 2015. – 390 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-09863-5>
11. Complexation of nickel ions by boric acid or (poly)borates / A. Graff [et al.] // J. Solution Chem. – 2017. – Vol. 46. – P. 25–43. <https://doi.org/10.1007/s10953-016-0555-x>
12. Zinc (II)–Boron (III) Aqueous Complex Formation Between 25 and 70 °C // T. Raynaud [et al.] // J. Solution Chem. – 2024. – Vol. 53. – P. 1017–1036. <https://doi.org/10.1007/s10953-023-01357-1>
13. Формы нахождения радионуклида кобальта-60 в растворах борной кислоты / А. М. Зарубо [и др.] // Вест. Нац. акад. навук Беларусі. Сер. хім. навук. – 2020. – Т. 56, № 1. – С. 24–32. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-24-32>
14. Karankova, V. Effect of boric acid on ¹⁰⁶Ru radionuclide speciation in aqueous solution / V. Karankova, A. Radkevich, N. Varonik // J. Radioanal. Nucl. Chem. – 2023. – Vol. 332. – P. 4561–4566. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-09158-y>
15. Руководство к практическим занятиям по радиохимии / под ред. Ан. Н. Несмеянова. – 2-е изд. перераб. – М.: Химия, 1980. – 584 с.
16. Charge Effects in the Fractionation of Natural Organics Using Ultrafiltration / A. I. Schafer [et al.] // Environ. Sci. Technol. – 2002. – Vol. 36, Iss. 12. – P. 2572–2580. <https://doi.org/10.1021/es0016708>
17. Beneš, P. Trace Chemistry of Aqueous Solutions: General Chemistry and Radiochemistry / P. Beneš, V. Majer. – Praga: Academia, 1980. – 100 p.

References

1. Hvastova M. S. Management of radioactive waste at nuclear industry enterprises. *Vestnik Rossiiskogo universiteta družby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = RUDN Journal of Ecology and Life Safety*, 2013, no. 1, pp. 97–106 (in Russian).
2. Muratov O. E., Stepanov I. K., Csareva S. M. Methods for processing liquid radioactive waste (analytical review). *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva [Ecology of Industrial Production]*, 2012, no. 3, pp. 30–43 (in Russian).
3. Gusev B. A., Semenov V. G., Efimov A. A., Panchuk V. V. Behavior of corrosion products in the primary circuit of a nuclear power plant with water coolant. *Vestnik of Saint Petersburg University. Physics and Chemistry*, 2012, iss. 4, pp. 110–118 (in Russian).
4. Kritskii V. G., Berezina I. G., Rodionov Y. A., Gavrilov A. V. The influence of operational and water chemistry parameters on the deposits of corrosion products on fuel assemblies at nuclear power plants with VVER reactors. *Thermal Engineering*, 2011, vol. 58, iss. 7, pp. 540–546. <https://doi.org/10.1134/S0040601511070093>
5. Kirov V. S. *Nuclear Power Plants*. Odessa, Odessa National Polytechnic University Publ., 2010. 216 p. (in Russian).
6. Starik I. E. *Basics of Radiochemistry*. Moscow, Nauka Publ., 1969. 648 p. (in Russian).
7. Davydov Yu. P., Davydov D. Yu. *Forms of Metal Ions (Radionuclides) in Solutions*. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2011. 301 p. (in Russian).
8. Perevotshikova N. B., Kornev V. I. On a question of iron (III) ions hydrolysis in aqueous solution. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Seriya: Fizika i khimiya [Bulletin of Udmurt University. Series: Physics and Chemistry]*, 2006, no. 8, pp. 189–198 (in Russian).
9. Mal'tseva T. V., Zinchenko Yu. A., Dobrovol'skaya I. Yu., Arkhipenko A. V. Influence of Chemical Correction of the Primary Coolant and Secondary Operating Environment of WWER and PWR NPPs on Radiation Safety. *Yaderna ta radiatsiina безпека [Nuclear and Radiation Safety]*, 2012, no. 4, pp. 37–43 (in Russian).
10. Kabay N., Hilal N., Bryjak M. *Boron Separation Processes*. Elsevier Inc., 2015. 390 p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-09863-5>
11. Graff A., Barrez E., Baranek P., Bachet M., Bénézeth P. Complexation of nickel ions by boric acid or (poly)borates. *Journal of Solution Chemistry*, 2017, vol. 46, pp. 25–43. <https://doi.org/10.1007/s10953-016-0555-x>
12. Raynaud T., Bachet M., Bénézeth P., Graff A. Zinc (II)–Boron (III) Aqueous Complex Formation Between 25 and 70 °C. *Journal of Solution Chemistry*, 2024, vol. 53, pp. 1017–1036. <https://doi.org/10.1007/s10953-023-01357-1>
13. Zarybo A. M., Radkevich A. M., Korenkova O. B., Voronik N. I. Cobalt-60 radionuclide speciation in boric acid solutions. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya khimichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*, 2020, vol. 56, no. 1, pp. 24–32 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2020-56-1-24-32>
14. Karankova V., Radkevich A., Varonik N. Effect of boric acid on ¹⁰⁶Ru radionuclide speciation in aqueous solution. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2023, vol. 332, pp. 4561–4566. <https://doi.org/10.1007/s10967-023-09158-y>
15. Nesmeyanov A. N. (ed.). *Guide to Practical Exercises in Radiochemistry*. Moscow, Khimiya Publ., 1980. 584 p. (in Russian).
16. Schafer A. I., Mauch R., Waite T. D., Fane A. G. Charge Effects in the Fractionation of Natural Organics Using Ultrafiltration. *Environmental Science and Technology*, 2002, vol. 36, iss. 12, pp. 2572–2580. <https://doi.org/10.1021/es0016708>
17. Beneš P., Majer V. *Chemistry of Aqueous Solutions: General Chemistry and Radiochemistry*. Praga, Academia, 1980. 100 p.

ISSN 1561-8358 (Print)
ISSN 2524-244X (Online)
<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-253-264>
УДК 621.039.001.5



Оригинальная статья

Э. А. Михалычева, А. Г. Трифонов*

*Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны
Национальной академии наук Беларуси,
а/я 119, 220109, Минск, Республика Беларусь*

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ АНАЛИЗ АВАРИЙНЫХ СЦЕНАРИЕВ БОЛЬШИХ ТЕЧЕЙ ПЕРВОГО КОНТУРА РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ТИПА ВВЭР

Аннотация. В рамках оценки безопасности АЭС с реактором ВВЭР выполнен вероятностный анализ аварийных сценариев с большими течами первого контура, которые имеют небольшую частоту возникновения, однако последствия развития такого аварийного процесса могут вызвать тяжелую аварию с повреждением ядерного топлива в реакторе и требуют тщательного исследования. При проведении вероятностного анализа разработаны логико-вероятностные модели методом построения деревьев событий с использованием программного кода RiskSpectrum. Вероятностный анализ аварийных сценариев больших течей первого контура эквивалентных диаметров D_e 249–850 мм позволил выявить критические пути и вероятности развития аварийных последовательностей, определить наиболее значимых вкладчиков в снижение безопасности реакторной установки. Критическим путем развития аварии с большими течами при работе энергоблока во всех режимах работы является аварийная последовательность (АП) с течью трубопровода к компенсатору давления. Наибольший вклад в невыполнение функций безопасности при возникновении больших течей первого контура вносят отказы по общим причинам элементов системы аварийного впрыска низкого давления теплоносителя в первый контур, а также элементов обеспечивающих систем. На основании результатов проведенных исследований разработаны рекомендации по повышению надежности выполнения системами функций безопасности при возникновении больших течей первого контура во всех эксплуатационных состояниях энергоблока АЭС.

Ключевые слова: атомная электростанция, вероятностный анализ, аварийные сценарии, системы безопасности, исходные события аварий, логико-вероятностные модели, течи первого контура реактора

Благодарности: работа подготовлена в рамках выполнения Государственной программы научных исследований «Энергетические системы, процессы и технологии» на 2021–2025 годы, задание 3.1.05, НИР 2 «Разработка логико-вероятностной модели протекания аварийного сценария больших течей первого контура в реакторной установке типа ВВЭР. Выявление наиболее значимых вкладчиков в снижение безопасности реакторной установки».

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Информация об авторах: *Михалычева Элина Александровна* – старший научный сотрудник Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: ella_mikh@mail.ru; *Трифонов Александр Георгиевич* – доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией Объединенного института энергетических и ядерных исследований – Сосны Национальной академии наук Беларуси. E-mail: tral@sosny.bas-net.by

Вклад авторов: *Михалычева Элина Александровна* – компьютерное моделирование, проведение вычислений, интерпретация результатов расчетов, формулировка выводов, написание и оформление текста рукописи; *Трифонов Александр Георгиевич* – постановка исследовательских целей и задач, планирование вычислений, обсуждение результатов и выводов, редактирование текста рукописи.

Для цитирования: Михалычева, Э. А. Вероятностный анализ аварийных сценариев больших течей первого контура реакторной установки типа ВВЭР / Э. А. Михалычева, А. Г. Трифонов // Вест. Нац. акад. наук Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. – 2024. – Т. 69, № 3. – С. 253–264. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2024-69-3-253-264>

Поступила в редакцию: 13.02.2024

Доработанный вариант: 06.09.2024

Утверждена к публикации: 17.09.2024

Подписана в печать: 24.09.2024

Original article

Elina A. Mikhalycheva, Alexander G. Trifonov*

*Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny
of the National Academy of Sciences of Belarus,
P. O. Box 119, 220109, Minsk, Republic of Belarus***PROBABILISTIC SAFETY ANALYSIS OF THE LARGE PRIMARY CIRCUIT LEAKAGES
ACCIDENT SCENARIOS IN THE VVER-REACTOR**

Abstract. Probabilistic safety analysis of the loss of coolant accidents in the VVER-type reactor plant has been performed taking into account the internal initiating events of the reactor primary circuit large leakages. Swedish program code RiskSpectrum PSA was used for probabilistic safety analysis. Logical probabilistic models of the accident scenarios of the large primary circuit leakages in the VVER-type reactor were developed taking into account different operation modes of the power plant unit. Critical paths and probabilities of the accident scenarios occurrence of the large leakages were identified. The critical path of development of the reactor primary circuit large leakages accident with large leakages of 140–346 mm diameters is the accident sequence with a leak in the pipeline to the reactor pressurizer vessel. It has been established that the greatest contribution to the failure of safety functions during this initiating event is made by the failures due to common causes of the supporting systems (cooling and ventilation systems), critical consumers cooling circuit, emergency injection system. The critical path of the accident with large leakages of 346–850 mm diameters is the accident sequence with the rupture of any of the four primary circuit loops. The greatest contribution to the failure of safety functions during this initiating event is made by the failures due to common causes of the emergency injection system elements. Based on the accident analysis, recommendations for increase of performance reliability of safety functions during the large leakages accidents under all operation states of the nuclear power plant unit were given. In order to increase reliability of safety systems, it is necessary to eliminate failures due to common causes of equipment, increase the reliability of operation of supporting systems, change the maintenance and checking equipment procedures.

Keywords: nuclear power plant, probabilistic safety analysis, accident scenarios, safety systems, initiating events, probabilistic safety models, reactor primary circuit leakages

Acknowledgements: the work was prepared as part of the implementation of the State Research Program “Energy systems, processes and technologies” for 2021–2025, task 3.1.05, research 2 “Development of a logical and probabilistic model for the occurrence of an emergency scenario of large primary circuit leaks in a VVER-type reactor plant. Identification of the most significant contributors to reducing the safety of the reactor plant”.

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

Information about the authors: *Elina A. Mikhalycheva* – Senior Researcher at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: ella_mikh@mail.ru; *Alexander G. Trifonov* – Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Laboratory at Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny of the National Academy of Sciences of Belarus. E-mail: tral@sosny.bas-net.by

Contribution of the authors: *Elina A. Mikhalycheva* – computer modeling, performing calculations, interpretation of calculation results, formulation of conclusions, writing and formatting the text of the manuscript; *Alexander G. Trifonov* – setting research goals and objectives, planning calculations, discussion of results and conclusions, editing the text of the manuscript.

For citation: Mikhalycheva E. A., Trifonov A. G. Probabilistic safety analysis of the large primary circuit leakages accident scenarios in the VVER-reactor. *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. 3. pp. 253–264 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1029-8940-2024-69-3-253-264>

Received: 13.02.2024

Modified: 06.09.2024

Approved for publication: 17.09.2024

Signed to the press: 24.09.2024

Введение. Развитие атомной энергетики в настоящее время предъявляет повышенные требования к основным принципам обеспечения безопасности в энергетике и предусматривает необходимость проведения качественного и количественного анализа иницирующих событий аварий с оценкой уровня безопасности АЭС. По результатам таких анализов разрабатываются и совершенствуются конструктивно-технологические, организационно-технические и эксплуатационные мероприятия, направленные на повышение безопасности АЭС.

Современная политика в вопросах обеспечения безопасности АЭС предполагает использование вероятностного анализа безопасности (ВАБ) для проверки соответствия станции вероятностным показателям безопасности, установленным правовыми нормативными документами¹.

¹ Общие положения обеспечения безопасности атомных электростанций: нормы и правила по обеспечению ядерной и радиационной безопасности. Введ. 13.04.2020. Минск: М-во по чрезвычайным ситуациям Респ. Беларусь, 2020. 34 с.

Численные показатели безопасности АЭС – суммарная вероятность тяжелых аварий (ВТА) и вероятность большого аварийного выброса (ВБАВ). Целевые ориентиры безопасности по суммарной вероятности для каждого блока АЭС на интервале в один год составляют: для ВТА – $1 \cdot 10^{-5}$, для ВБАВ – $1 \cdot 10^{-7}$. Достигается выполнение этих показателей за счет увеличения количества систем безопасности, усложнения их структуры, реализации сложных технических решений и, соответственно, удорожания проекта АЭС. Снятие консерватизма оценок и получение более точных могло бы позволить избежать излишних материальных затрат без снижения надежности выполнения функций безопасности.

Несмотря на высокую надежность систем безопасности АЭС с реакторными установками нового поколения, все еще остается малая вероятность возникновения событий, которые могут привести к расплаву активной зоны. Наиболее опасной с точки зрения вероятности разрушения барьеров безопасности является авария, сопровождающаяся потерей теплоносителя первого контура и приводящая в случае невыполнения функций безопасности системами АЭС к расплавлению активной зоны и выбросу радиоактивных веществ за пределы первого контура. Актуальным методом повышения безопасности АЭС с реакторами типа ВВЭР является анализ аварий, связанных с большими течами первого контура, смягчение их последствий путем внесения изменений в конструкцию ядерного реактора или практику эксплуатации и обслуживания.

Проблема развития аварий с потерей теплоносителя в первом контуре реактора (англ. LOCA – Loss of Coolant Accident) исследовалась для различных типов реакторов как российского производства типа ВВЭР, так и зарубежных – PWR [1–4]. В качестве аварий с большой потерей теплоносителя первого контура рассматривался целый спектр постулируемых аварий разрыва трубопроводов главного циркуляционного тракта и трубопроводов меньших диаметров [4, 5].

Анализ аварий с точки зрения оценки частоты повреждения активной зоны реактора побудил к использованию методов ВАБ для оценки безопасности АЭС. Ряд авторов в своих исследованиях продемонстрировали актуальность методологии ВАБ в анализе аварийных процессов, связанных с течами первого контура реактора [5–8].

Результаты детерминистического анализа определяют границы перехода проектных условий развития аварийного процесса в запроектные, то есть тяжелую аварию, тем самым устанавливая критерии для оценки успешности или не успешности выполнения функций безопасности для вероятностного анализа. Одним из основных отличий ВАБ от детерминистического анализа безопасности является систематизированный и реалистичный подход к полному анализу последовательностей для широкого спектра исходных событий аварий. В процессе вероятностного анализа безопасности выявляются пути развития аварийной ситуации с учетом взаимодействия систем безопасности, отказов элементов систем, ошибок персонала, возможных отказов по общей причине. ВАБ позволяет выявить системы, для которых проектные улучшения или изменения процедур управления могут снизить вероятность тяжелых аварий или снизить их последствия.

Большие течи первого контура имеют небольшую частоту возникновения, например, для реакторной установки с ВВЭР-1200 в зависимости от диаметра течи частота составляет от $1,54E^{-05}$ до $1,02E^{-07}$ на реактор в год [9]. Однако последствия развития такого аварийного процесса могут вызвать тяжелую аварию с повреждением ядерного топлива в реакторе и требуют тщательного исследования для определения критических путей протекания аварии, определения основных вкладчиков в вероятность ее возникновения, а также разработки дополнительных технических и организационных мер для обеспечения безопасности АЭС.

Цель настоящего исследования – разработать логико-вероятностные модели протекания аварийных сценариев больших течей первого контура в реакторной установке типа ВВЭР, выявить критические пути развития аварийных последовательностей, наиболее значимых вкладчиков в снижение безопасности реакторной установки, а также предложить меры по повышению надежности работы систем и элементов реакторной установки.

Методика проведения вероятностного анализа безопасности для оценки безопасности энергоблока АЭС. Объектом исследования ВАБ являются источники повышенной радиоактивности на АЭС: активная зона реактора и отработавшее ядерное топливо в бассейне выдержки. Объем исследований ВАБ включает в себя все внутренние исходные события (отказы оборудо-

вания, ошибки персонала), внешние (техногенные и природные) и внутренние (пожары, затопления и т. п.) воздействия. ВАБ должен выполняться для всех эксплуатационных состояний (ЭС), включая работу на мощности и стояночные режимы, включающие перегрузку топлива и/или ремонта оборудования, а также все переходные состояния (см. РБ-024-19).

Полномасштабный ВАБ должен быть выполнен для всех трех уровней, включая определение: 1) суммарной вероятности повреждения ядерного топлива, находящегося на энергоблоке (ВАБ-1), 2) вероятности аварийных выбросов (ВАБ-2) и 3) последствий выбросов (оценку риска смерти и возможного экономического ущерба – ВАБ-3).

Цель вероятностного анализа безопасности уровня 1 состоит в выявлении последовательности событий, которые могут привести к тяжелым авариям и повреждению ядерного топлива; определении суммарной частоты тяжелых аварий, а также сбалансированности проекта энергоблока; выявлении приоритетов повышения мер безопасности, исходя из информации о риске.

Вероятностный анализ безопасности для внутренних исходных событий (ИС) аварий включает формирование перечня групп ИС, связанных с отказами оборудования, систем, ошибками персонала, которые должны быть включены в ВАБ; разработку для каждой группы ИС логико-вероятностных моделей для определения полных множеств возможных конечных состояний аварийных последовательностей и вероятности их осуществления. В качестве вероятностных моделей безопасности наиболее широко применяются деревья событий (ДС) и деревья отказов (ДО) [10].

Деревья событий являются графическими моделями, которые упорядочивают и отображают события протекания аварии (выполнение функций безопасности или работу систем) согласно требованиям по управлению авариями. Они показывают, как среагируют системы АЭС на рассматриваемое ИС, будут ли выполнены при этом функции безопасности, и что произойдет в итоге, как отразится ИС на безопасности объекта.

ДС представляет собой логическую диаграмму, по которой определяется множество возможных конечных состояний АЭС, каждое из которых является реализацией определенных совокупностей (сочетаний, комбинаций) промежуточных событий при заданном исходном событии. Для ИС, возможных в различных эксплуатационных состояниях, моделируется дерево событий, определяющее вероятность реализации исходного события в том или ином ЭС.

Для количественной оценки дерева событий необходимо разработать ДО систем безопасности путем идентификации основных событий, то есть отказов оборудования и ошибок персонала, которые могут привести к отказу систем. Исследование основывается на информации об отказах, неполадках и т. д., полученной из опыта эксплуатации и собранной в специальных базах данных.

Результатом логико-вероятностной оценки групп исходных событий является выявление доминантных аварийных последовательностей, имеющих наибольшую вероятность осуществления, а также анализ полученного списка минимальных сечений, вносящих наибольший вклад в осуществление аварийных сценариев, которые приводят к тяжелым авариям.

Под минимальным сечением понимается наименьшее сочетание базисных событий (включая отказы элементов систем, ошибки персонала), в результате которого реализуется негативное последствие (например, отказ системы). Минимальное сечение представляет собой логическое произведение входящих в него базисных событий, а набор минимальных сечений – логическую сумму отдельных минимальных сечений. В качестве базисных событий в минимальные сечения также могут входить отказы элементов по общим причинам (ООП), вызванные отказом нескольких или даже всех одинаковых элементов систем, выполняющих одинаковые функции, а также по причине дефекта изготовления, нерегламентного обслуживания, условий работы оборудования, выходящих за рамки номинальных параметров, и т. п.

Анализ списка доминирующих минимальных сечений позволяет выявить элементы (сочетания элементов) систем и ошибки оператора, которые вносят наибольший вклад в снижение безопасности энергоблока, а также выработать рекомендации по повышению безопасности.

В процессе вероятностной оценки исходных событий аварий или систем безопасности АЭС проводится анализ значимости базовых событий (отказов) по показателям Fussell–Vessely (FV) и Birnbaum (B), а также определяются коэффициенты изменения риска [10]:

коэффициент уменьшения риска – RDF (Risk Decrease Factor);

коэффициент увеличения риска – RIF (Risk Increase Factor).

Показатель значимости FV события X определяется как относительный вклад события в ВТА. Значимость этого показателя может быть выражена как сумма вкладов минимальных сечений, содержащих событие X :

$$FV = [F(X) - F(0)]/F(X), \quad (1)$$

где $F(X)$ – это ВТА или вероятность отказа системы при номинальной вероятности базисного события, а $F(0)$ – ВТА в предположении, что событие не произошло.

Показатель значимости В события X определяется как отношение изменения вероятности повреждения активной зоны ($P(X)$) к изменению вероятности реализации события X (производная):

$$B(X) = \frac{d}{dX} P(X), \text{ или } B(X) = F(1) - F(0), \quad (2)$$

где $F(1)$ – это ВТА в предположении, что событие реализовалось. Таким образом, мера Fussell–Vessely значимости Birnbaum представляет собой разницу между ВТА, вычисленной в предположении реализации события X , и ВТА, вычисленной в предположении, что событие X не реализовалось.

Коэффициент уменьшения риска показывает снижение ВТА при абсолютной надежности элемента (вероятность отказа равна 0), тем самым определяя набор элементов систем, увеличение надежности которых с наименьшими затратами позволяет повысить надежность энергоблока в целом:

$$RDF = F(X)/F(0). \quad (3)$$

В свою очередь коэффициент увеличения риска показывает увеличение ВТА при абсолютной ненадежности элемента (вероятность отказа равна 1), позволяя выявить элементы систем, существенно влияющие на снижение надежности энергоблока:

$$RIF = F(1)/F(X). \quad (4)$$

Вероятностный анализ аварийных сценариев больших течей первого контура реакторной установки с ВВЭР. Для обеспечения радиационной безопасности при производстве электроэнергии на АЭС предусмотрены четыре барьера защиты, одним из которых является граница первого контура, препятствующая проникновению продуктов деления в окружающую среду.

Большие течи первого контура в реакторах типа ВВЭР возникают вследствие разрывов «холодных» или «горячих» трубопроводов главного циркуляционного тракта (ГЦТ) или систем, связанных с первым контуром. В результате возникновения течи происходит резкое снижение давления и количества теплоносителя в первом контуре, а также уровня в компенсаторе давления, с потенциальным риском оголения и повреждения активной зоны.

Предусмотренные в проекте системы безопасности обеспечивают выполнение основных функций безопасности: останов реактора, послеаварийное охлаждение активной зоны и перевод реакторной установки в безопасное состояние. Выход в защитную герметичную оболочку (ГО) большого объема теплоносителя с его последующим вскипанием создает избыточное давление, которое может нарушить герметичность ГО и допустить выход радиоактивных продуктов в окружающую среду. Работа спринклерной системы позволяет эффективно снижать избыточное давление под ГО. Компенсация утечек теплоносителя из первого контура и охлаждение активной зоны в авариях с потерей теплоносителя осуществляется системой аварийного охлаждения активной зоны высокого и низкого давления (САОЗ ВД и САОЗ НД) и пассивной частью системы, к которой относится система емкостей САОЗ.

В зависимости от сценария протекания аварии, конфигурации систем, требуемых для выполнения функций безопасности при данном ИС (системы подпитки первого контура, системы отвода тепла через первый и второй контуры), большие течи первого контура делятся на три диапазона с эквивалентными диаметрами: $D_y = 140\text{--}279$ мм (ИС LL1), $D_y = 279\text{--}346$ мм (ИС LL2), $D_y = 346\text{--}850$ мм (ИС LL3). При данных течах могут возникать зависимые отказы систем – в зависимости от места течи могут быть недоступны гидроемкости системы аварийного охлаждения активной зоны (САОЗ), а также отдельные каналы САОЗ НД и САОЗ ВД соответственно [9, 11].

Для анализа больших течей первого контура АЭС созданы логико-вероятностные модели протекания аварийных процессов с использованием программного кода RiskSpectrum PSA. В свою очередь для различных эксплуатационных состояний энергоблока (работа на мощности, режимы останова) разработаны отдельные деревья событий, включающие альтернативные пути протекания аварии – аварийные последовательности (АП). Согласно РБ-024-19 под «успешными окончаниями АП» подразумевается выполнение функций безопасности системами безопасности, под «неуспешными окончаниями» – переход проектной аварии в стадию тяжелой аварии.

В качестве критерия повреждения ядерного топлива принималось превышение хотя бы одного из следующих максимальных проектных пределов, характеризующих повреждение тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ):

- максимальная температура оболочки ТВЭЛОВ в течение всего периода аварии не превышает 1200 °С;
- глубина локального окисления оболочки ТВЭЛОВ не более 18 % от исходной толщины оболочки;
- радиально усредненная энтальпия топлива не более 963 Дж/г UO₂ по оси любого ТВЭЛА.

Под безопасным состоянием понимается стабильное состояние реакторной установки с подкритичным состоянием ядерного топлива и невыпадением в ходе режима вышеперечисленных критериев. Состояние характеризуется стабилизированными параметрами теплоносителя на интервале времени до 24 ч от момента возникновения иницирующего события, которое обеспечивается работой систем безопасности в автономном режиме (в границах площадки АЭС) [9, 11].

Результаты и их обсуждение. Вероятность возникновения больших течей первого контура LL1 невелика и составляет $1,54E^{-05}$, между тем достаточно высока надежность выполнения функций системами безопасности. Вследствие этого вероятности осуществления аварийных последовательностей с неуспешными конечными состояниями составляют от $4,93E^{-10}$ до $9,38E^{-15}$. Критическим путем развития аварии с большой течью LL1 при работе энергоблока как на мощности (вероятность $4,93E^{-10}$), так и в стояночных режимах (вероятность $4,79E^{-12}$) является АП 10 с течью трубопровода к компенсатору давления.

На рис. 1 представлена логическая диаграмма дерева событий для исходного события большой течи первого контура эквивалентным диаметром $D_y = 140–346$ мм (ИС LL1) при работе энергоблока на мощности. Дерево событий для ИС LL1 в режимах останова энергоблока показано на рис. 2.

В верхней строке диаграммы ДС на рис. 1, 2 представлены этапы развития аварийного процесса и необходимые для управления аварией функции безопасности. В диаграмме приведены функции снижения давления под ГО спринклерной системой, а также подпитка теплоносителем первого контура каналами системы САОЗ. Выполнение функций безопасности приводит к «успешному» конечному состоянию (ОК), невыполнение – к тяжелой аварии с плавлением топлива

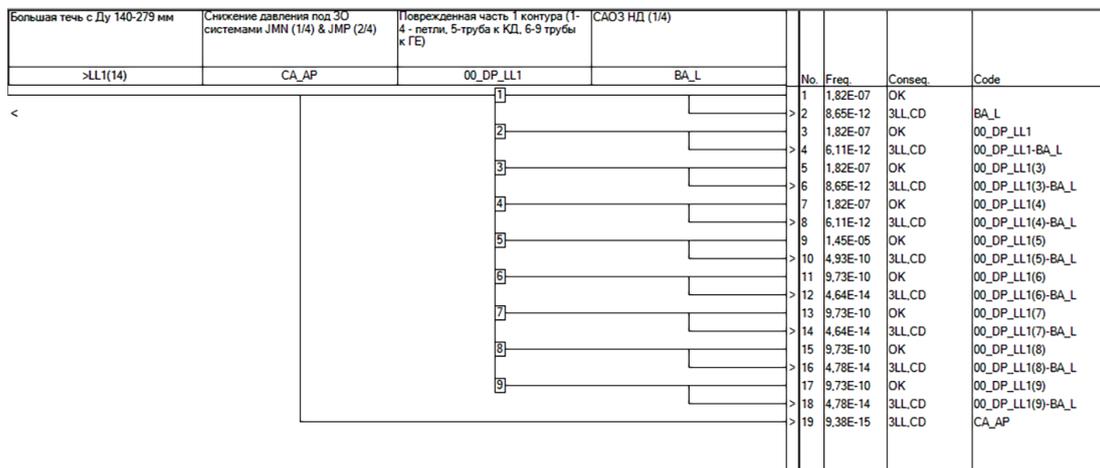


Рис. 1. Дерево событий для большой течи LL1 при работе энергоблока на мощности

Fig. 1. Event tree for the large leakage LL1 accident for unit power operation

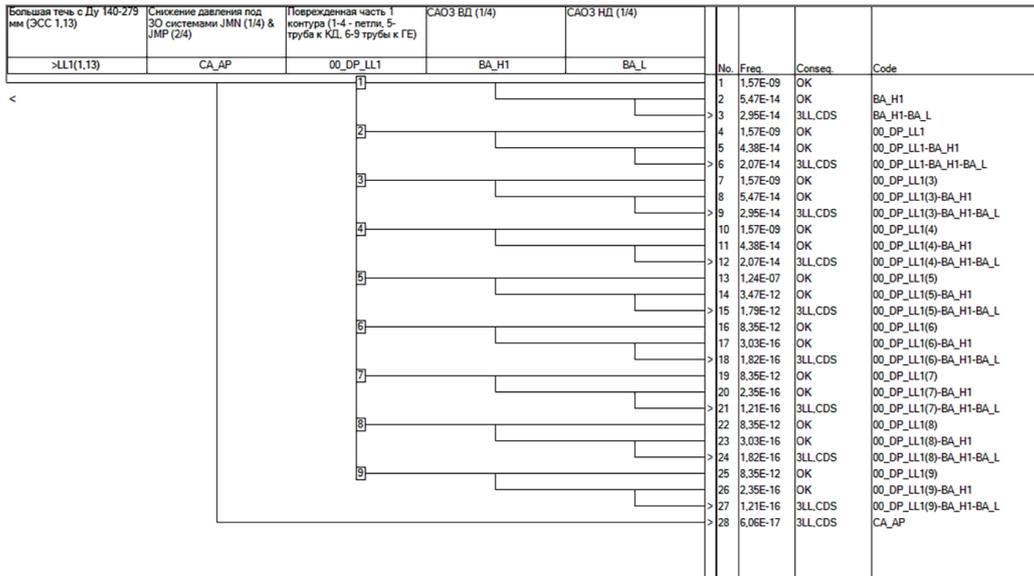


Рис. 2. Дерево событий для большой течи LL1 при работе блока в режимах останова энергоблока

Fig. 2. Event tree for the large leakage LL1 accident for unit shutdown regimes

(CD для работы блока на мощности или CDS для стояночных режимов). Вероятности осуществления успешных и неуспешных конечных состояний также приведены на диаграмме ДС.

Для анализа протекания аварии в режимах останова энергоблока создано отдельное ДС, которое учитывает доступность и состояние систем безопасности и их каналов (вывод каналов в ремонт и обслуживание) в различных эксплуатационных состояниях станции (ЭСС) и связанное с этим изменение надежности выполнения функций безопасности.

Кроме того, на диаграмме ДС определена локализация возникновения течи первого контура, которая влияет на скорость и ход протекание аварийного процесса (третья колонка диаграммы ДС). Например, разрыв трубопровода компенсатора давления (КД) не только приводит к течи первого контура, но и не позволяет использовать запасенный в КД объем теплоносителя для охлаждения активной зоны реактора. Развитие АП и вероятности конечных состояний в зависимости от места течи приведены на диаграммах ДС (см. рис. 1, 2).

Анализ аварии, связанной с возникновением исходного события с большой течью LL1 показывает, что вероятность достижения всех конечных состояний с повреждением топлива, находящегося в реакторе (КС CD), составляет $9,41E^{-11}$ при работе на мощности и $8,74E^{-12}$ – при работе в стояночных режимах (КС CDS).

В результате анализа неопределенности, выполненного для аварийной последовательности ИС LL1, определен 90%-ный доверительный интервал. При работе блока на мощности: нижняя граница (5 %) – $8,71E^{-10}$, медиана (50 %) – $1,32E^{-11}$, верхняя граница (95 %) – $4,46E^{-11}$. Для стояночных режимов: нижняя граница (5 %) – $7,62E^{-13}$, медиана (50 %) – $2,41E^{-12}$, верхняя граница (95 %) – $8,43E^{-12}$.

В табл. 1 представлен список доминирующих минимальных сечений, приводящих к неуспешному окончанию аварийной последовательности для ИС LL1 при работе энергоблока на мощности. В горизонтальных строках приведены базисные события (единичные отказы, отказы по общим причинам элементов систем и т. д.), составляющие минимальное сечение. Кроме того, для каждого минимального сечения указана вероятность его осуществления и вклад (в %) в общую вероятность отказа (англ. Event frequency F). Фиолетовым цветом выделены события отказов по общим причинам. Событие T_FACTOR1 показывает необходимость длительного (более 24 ч) выполнения функции безопасности.

Диаграмма вкладов доминирующих минимальных сечений для ИС LL1 при работе энергоблока на мощности представлена на рис. 3.

Наибольший вклад в невыполнение функций безопасности при возникновении исходного события LL1 вносят минимальные сечения с отказами по общим причинам обеспечивающих

систем (систем охлаждения оборудования, вентиляции здания систем безопасности), а также отказы по общим причинам элементов системы аварийного впрыска (низкого давления) теплоносителя в первый контур (насосы, обратные клапаны), так как в состояниях останова необходимо осуществление длительного отвода остаточного тепла от активной зоны реактора с помощью насосов данной системы.

Т а б л и ц а 1. Список доминирующих минимальных сечений для исходных событий LL1 при работе блока на мощности

Table 1. List of dominant minimal cut sets for initial events LL1 for unit power operation

№	Вероятность	% вклада	Событие 1	Событие 2	Событие 3	Событие 4	Событие 5	Событие 6
1	$3,57E^{-11}$	37,98	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DT_LL1	_POS14(LL)		
2	$2,39E^{-11}$	25,41	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-3AA	_DT_LL1	_POS14(LL)		
3	$1,34E^{-11}$	14,23	IE-LL1	KLГZ1AN001FAR-ALL	_DT_LL1	_POS14(LL)		
4	$6,65E^{-12}$	07,07	IE-LL1	KLГZ1AN001FAR-3AA	_DT_LL1	_POS14(LL)		
5	$1,43E^{-12}$	01,52	IE-LL1	CRAZ1__SWF	_DT_LL1	_POS14(LL)		
6	$4,51E^{-13}$	00,48	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DL1_LL1	_POS14(LL)		
7	$4,51E^{-13}$	00,48	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DL3_LL1	_POS14(LL)		
8	$4,51E^{-13}$	00,48	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DL2_LL1	_POS14(LL)		
9	$4,51E^{-13}$	00,48	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-ALL	_DL4_LL1	_POS14(LL)		
10	$3,01E^{-13}$	00,32	IE-LL1	KLГZ1AN0001FAS-3AD	_DL1_LL1	_POS14(LL)		
11	$3,01E^{-13}$	00,32	IE-LL1	KLГZ1AN001FAS-3AB	_DL1_LL1	_POS14(LL)		
12	$2,97E^{-13}$	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23	_DL1_LL1	_PEV_22_42	_POS14(LL)	_T_FACTOR1
13	$2,97E^{-13}$	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23	_DL1_LL1	_PEV_22_31	_POS14(LL)	_T_FACTOR1
14	$2,97E^{-13}$	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23	_DL1_LL1	_PEV_11_32	_POS14(LL)	_T_FACTOR1
15	$2,97E^{-13}$	00,32	IE-LL1	KAAZ0AP001PMR-23	_DL1_LL1	_PEV_12_41	_POS14(LL)	_T_FACTOR1

Примечание. Максимальная частота событий $F = 9,412E^{-11}$.

Note. Top Event frequency $F = 9,412E^{-11}$.

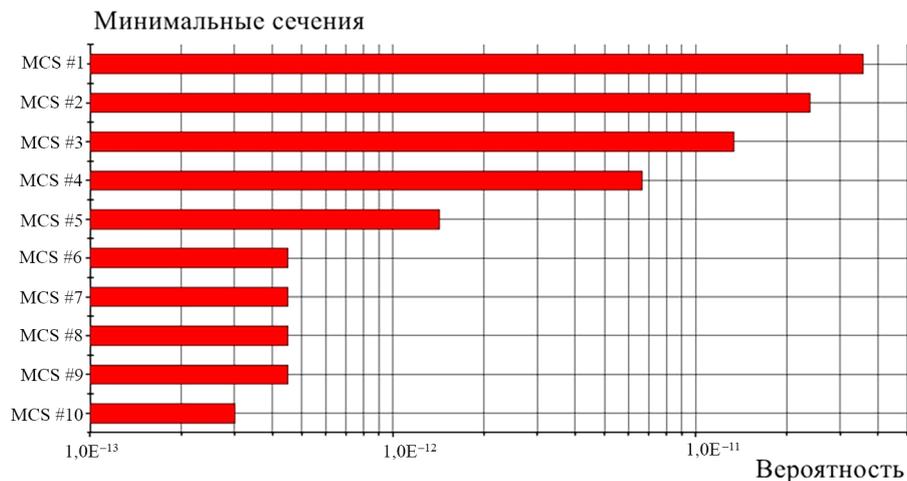


Рис. 3. Диаграмма вкладов доминирующих минимальных сечений для исходных событий LL1 при работе энергоблока на мощности

Fig. 3. Diagram of contribution of dominant minimal cut sets for initial events LL1 for unit power operation

Для ИС LL2 вероятности осуществления аварийных последовательностей (путей развития аварии) с неуспешными конечными состояниями при работе блока на мощности составляет от $2,49E^{-10}$ до $4,40E^{-15}$. Наибольшую вероятность осуществления конечного состояния CD для ЭСС 14 имеет АП 10 с течью трубопровода к компенсатору давления, ее вероятность составляет $2,49E^{-10}$, следовательно, она является критическим путем развития аварии с большой течью LL2 при работе энергоблока на мощности. В табл. 2 представлен список доминирующих минимальных сечений, приводящих к неуспешному окончанию аварийной последовательности для ИС LL2 при работе энергоблока на мощности.

Т а б л и ц а 2. Список доминирующих минимальных сечений для исходных событий LL2 при работе блока на мощности

Table 2. List of dominant minimal cut sets for initial events LL2 for unit power operation

№	Вероятность	% вклада	Событие 1	Событие 2	Событие 3	Событие 4
1	8,63E ⁻¹¹	24,89	IE-LL2	JNGZ0AA60YVCO-ALL	_DP_LL2	_POS14(LL)
2	3,91E ⁻¹¹	11,28	IE-LL2	JNGZ0AA60YVCO-3AA	_DP_LL2	_POS14(LL)
3	3,83E ⁻¹¹	11,04	IE-LL2	JNGZ0AP001PMS-ALL	_DP_LL2	_POS14(LL)
4	3,73E ⁻¹¹	10,75	IE-LL2	JNGZ0AP001PMR-ALL	_DP_LL2	_POS14(LL)
5	2,68E ⁻¹¹	07,72	IE-LL2	JNGZ0AP001PMS-3AA	_DP_LL2	_POS14(LL)
6	2,38E ⁻¹¹	06,86	IE-LL2	JNGZ0AP001PMR-3AA	_DP_LL2	_POS14(LL)
7	1,81E ⁻¹¹	05,21	IE-LL2	KLZ54U1.01JPF-ALL	_DP_LL2	_POS14(LL)
8	1,21E ⁻¹¹	03,49	IE-LL2	KLZ54U1.01JPF-3AA	_DP_LL2	_POS14(LL)
9	8,35E ⁻¹²	02,41	IE-LL2	KLZ54U4.04JPF-ALL	_DP_LL2	_POS14(LL)
10	8,35E ⁻¹²	02,41	IE-LL2	KLZ54U1.01JPF-ALL	_DP_LL2	_POS14(LL)
11	6,77E ⁻¹²	01,95	IE-LL2	KLZ54U1.01JPF-3AA	_DP_LL2	_POS14(LL)
12	5,44E ⁻¹²	01,57	IE-LL2	JNGZ3AA102VMO-ALL	_DP_LL2	_POS14(LL)
13	4,34E ⁻¹²	01,25	IE-LL2	JNGZ3AA102VMO-3AA	_DP_LL2	_POS14(LL)
14	4,15E ⁻¹²	01,20	IE-LL2	CLZ54U4.04JPF-3AA	_DP_LL2	_POS14(LL)
15	4,15E ⁻¹²	01,20	IE-LL2	CLZ54U1.01JPF-3AB	_DP_LL2	_POS14(LL)

Примечание. Максимальная частота событий $F = 3,468E^{-10}$.

Note. Top Event frequency $F = 3.468E^{-10}$.

На рис. 4 приведена диаграмма вкладов доминирующих минимальных сечений для ИС LL2 при работе энергоблока на мощности.

Установлено, что наибольшую вероятность осуществления конечного состояния CDS для стояночных режимов также имеет АП 10 с течью трубопровода к компенсатору давления, ее вероятность составляет $2,42E^{-12}$, следовательно, она является критическим путем развития аварии с большой течью LL2 при работе энергоблока в стояночных режимах.

Наибольший вклад в невыполнение функций безопасности при возникновении исходного события LL2 вносят минимальные сечения с отказами по общим причинам обеспечивающих систем (система вентиляции здания безопасности KLG, холодильные машины). В свою очередь наибольший вклад в невыполнение функций безопасности при возникновении исходного события LL2 в режимах останова вносят отказы по общим причинам элементов системы САОЗ НД (насосы, обратные клапаны), так как в состояниях останова необходимо осуществление длительного отвода остаточного тепла от активной зоны реактора с помощью насосов данной системы.

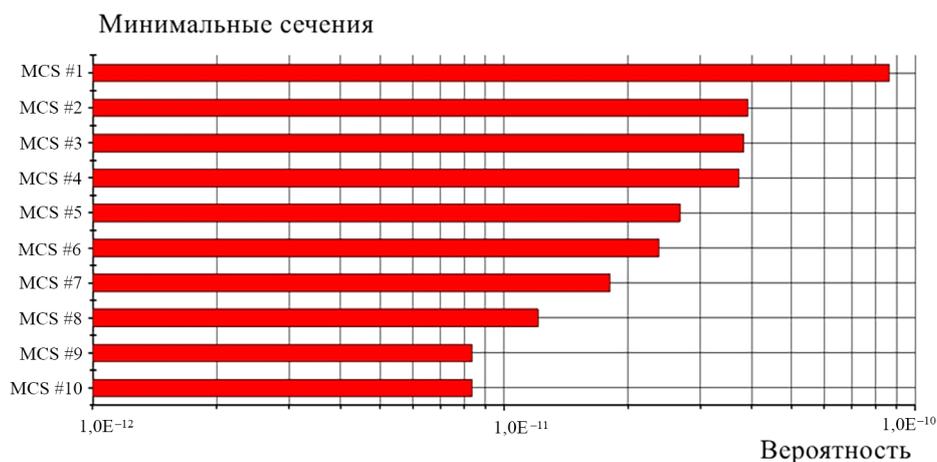


Рис. 4. Диаграмма вкладов доминирующих минимальных сечений для исходных событий LL2 при работе энергоблока на мощности

Fig. 4. Diagram of contribution of dominant minimal cut sets for initial events LL2 for unit power operation

Анализ аварии, связанной с возникновением исходного события с большой течью LL2, показывает, что вероятность достижения конечных состояний с повреждением топлива, находящегося в реакторе, составляет $3,47E^{-10}$ при работе на мощности, при работе в стояночных режимах вероятность равна $8,88E^{-12}$. Критическим путем развития аварии при работе энергоблока на мощности и в стояночных режимах является аварийная последовательность с течью трубопровода к компенсатору давления, ее вероятность составляет $2,49E^{-10}$ при работе на мощности, при работе в стояночных режимах – $2,42E^{-12}$.

В результате анализа неопределенности, выполненного для аварийной последовательности ИС LL2, получены границы 90 % доверительного интервала при работе блока на мощности: нижняя граница (5 %) – $3,71E^{-11}$, медиана (50 %) – $5,41E^{-10}$, верхняя граница (95 %) – $4,46E^{-10}$. При работе блока в стояночных режимах границы 90 % доверительного интервала составляют: нижняя граница (5 %) – $3,62E^{-12}$, медиана (50 %) – $9,81E^{-12}$, верхняя граница (95 %) – $4,43E^{-11}$.

Для надежного выполнения функций безопасности системами в случае возникновения больших течей первого контура LL1, LL2 при работе во всех эксплуатационных состояниях следует обеспечить надежное функционирование основного оборудования систем, а также повысить надежность работы обеспечивающих систем, в том числе путем изменения процедур обслуживания и проверок оборудования, сократив интервалы между испытаниями для исключения накопления скрытых отказов оборудования в режимах ожидания.

Анализ аварии, связанной с возникновением исходного события с большой течью LL3 при работе энергоблока на мощности и в стояночных режимах показывает достаточную защищенность энергоблока от развития данной аварии, вероятность достижения конечных состояний с повреждением топлива, находящегося в реакторе, составляет $1,73E^{-11}$ при работе на мощности, при работе в стояночных режимах – $5,73E^{-14}$. Критическим путем развития аварии с большой течью LL3 как при работе энергоблока на мощности, так и в стояночных режимах является разрыв любой из четырех петель ГЦТ.

Наибольший вклад в невыполнение функций безопасности при возникновении исходного события LL3 при работе на мощности и в режимах останова вносят отказы по общим причинам элементов системы САОЗ НД (насосы, обратные клапаны), при этом вклады отдельных базисных событий невелики и распределены в доминирующих сечениях достаточно равномерно.

Анализ значимости позволяет определить наиболее «слабые» места проекта АЭС и те элементы, проведенные мероприятия по улучшению надежности которых позволят с наименьшими затратами повысить надежность всего блока или системы в целом. На рис. 5 приведена диаграмма коэффициентов снижения риска (RDF) для базисных событий (отказов) элементов систем.



Рис. 5. Диаграмма коэффициентов снижения риска (RDF) для базисных событий LL1

Fig. 5. Risk decrease factor (RDF) diagram for basic events LL1

Анализ диаграммы RDF для базисных событий для аварийного сценария большой течи первого контура LL1 показывает, что наиболее значимыми являются элементы обеспечивающих систем, таких как рециркуляционная система охлаждения технологических помещений (KLG) и промконтур отвода тепла от ответственных потребителей (КАА), поскольку от их эффективной работы зависит выполнение функций безопасности системами безопасности. Повышение надежности работы данных систем существенным образом и наиболее эффективно позволят повысить надежность выполнения функций безопасности при отводе тепла от топлива в реакторе в случае возникновения больших течей первого контура.

Заключение. Проведенный вероятностный анализ протекания аварийных сценариев больших течей первого контура эквивалентных диаметров $D_y = 249\text{--}850$ мм в реакторной установке типа ВВЭР позволил выявить критические пути и вероятности развития аварийных последовательностей, определить наиболее значимых вкладчиков в снижение безопасности реакторной установки.

Критическим путем развития аварии с большой течью LL1 при работе энергоблока во всех режимах работы является аварийная последовательность с течью трубопровода к компенсатору давления, вероятность осуществления которой составляет $4,93E^{-10}$ для LL1 и $2,49E^{-10}$ – для LL2 при работе энергоблока на мощности. При работе в стояночных режимах энергоблока вероятности равны $4,79E^{-12}$ – для LL1 и $2,42E^{-12}$ – для LL2.

Установлено, что наибольший вклад в невыполнение функций безопасности при возникновении исходного события LL1,2 вносят минимальные сечения с отказами по общим причинам элементов системы аварийного впрыска (низкого давления) теплоносителя в первый контур, так как в состояниях останова необходимо осуществление длительного отвода остаточного тепла от активной зоны реактора с помощью насосов данной системы, а также с отказами по общим причинам обеспечивающих систем.

Для исходного события LL3 вероятности осуществления конечного состояния с тяжелыми авариями распределены равномерно между всеми четырьмя петлями главного циркуляционного тракта, вероятность достижения конечных состояний с повреждением топлива составляет $1,73E^{-11}$ при работе на мощности и $5,73E^{-14}$ – при работе в стояночных режимах. Критическим путем развития аварии с большой течью LL3 как при работе энергоблока на мощности, так и в стояночных режимах является разрыв любой из четырех петель ГЦТ.

Для выполнения функций безопасности системами при возникновении исходного события больших течей первого контура при работе во всех эксплуатационных состояниях энергоблока следует обеспечить надежное функционирование оборудования систем безопасности, исключив отказы элементов по общим причинам, а также повысить надежность работы обеспечивающих систем (систем вентиляции, охлаждения и кондиционирования), в том числе путем изменения процедур обслуживания и проверок оборудования, сократив интервалы между испытаниями для исключения накопления скрытых отказов оборудования и ООП в режимах ожидания.

Анализ диаграммы RDF для базисных событий показывает, что повышение надежности рециркуляционной системы охлаждения (KLG) и промконтура отвода тепла от ответственных потребителей (КАА) существенным образом позволят повысить надежность выполнения функций безопасности при отводе тепла от топлива в реакторе в случае возникновения больших течей первого контура.

Список использованных источников

1. Верификация расчетных кодов ТЕЧЬ-М, КОРСАР/ГП по результатам экспериментов на крупномасштабном стенде GE2M-ПГ / А. В. Морозов [и др.] // Изв. вузов. Ядер. энергетика. – 2012. – № 3. – С. 129–139.
2. Кавун, О. Ю. Разработка методики расчета давления в первом контуре в условиях больших течей в моделях экспресс-оценки для информационно-аналитического центра Ростехнадзора / О. Ю. Кавун, Г. Р. Пипченко // Ядер. и радиац. безопасность. – 2020. – № 3 (97). – С. 23–31. <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2020.97.3.003>
3. Жолнерович А. Ю. Анализ аварий с потерей теплоносителя [Электронный ресурс] / А. Ю. Жолнерович // Актуальные проблемы энергетики – 2022: материалы студенч. науч.-техн. конф. / сост.: И. Н. Прокопеня, Т. А. Петровская; редкол.: Е. Г. Пономаренко (предс.) [и др.]. – Минск: БНТУ, 2022. – С. 350–354. – Режим доступа: <https://rep.bntu.by/handle/data/126012>. – Дата доступа: 15.01.2024.

4. Белозеров, В. И. Аварийные и переходные режимы на АЭС с реактором ВВЭР-1000: учеб. пособие / В. И. Белозеров, М. М. Жук, Н. И. Гераскин. – М.: НИЯУ МИФИ, 2019. – 176 с.
5. The PSA analysis of PWR emergency coolant injection availability following SBLOCA / M. Borysiewicz [et al.] // *Nukleonika*. – 2013. – Vol. 58, № 2. – P. 307–316.
6. Analysis and Estimation of Core Damage Frequency of Flow Blockage and Loss of Coolant Accident: A Case Study of a 10 MW Water-Water Research Reactor-PSA Level 1 / F. Ameyaw [et al.] // *Sci. Technol. Nucl. Installations*. – Vol. 2021. – 17 p. – Art. ID 9423176. <https://doi.org/10.1155/2021/9423176>
7. Hirata, D. M. Estimative of core damage frequency in IPEN's IEA-R1 research reactor due to the initiating events of loss of flow caused by channel blockage and loss of coolant caused by large rupture in the pipe of the primary circuit PSA Level 1 [Electronic resource] / D. M. Hirata, G. Sabundjian // 2011 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2011 Belo Horizonte, MG, Brazil, October 24–28, 2011 / Associação Brasileira de Energia Nuclear – ABEN. – Mode of access: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105222.pdf. – Date of access: 15.01.2024.
8. Ryabinin, I. A. Quantitative examples of safety assessment using logical-probabilistic methods / I. A. Ryabinin, A. V. Strukov // *Int. J. Risk Assessment and Management (IJRAM)*. – 2018. – Vol. 21, № 1/2. – P. 4–20. <https://10.1504/IJRAM.2018.10011305>
9. Mikhalycheva, E. Probabilistic Safety Analysis of the Large LOCA Accident in the VVER-Reactor Plant / E. Mikhalycheva, K. Artemyeva // *Nonlinear Dynamics and Applications: Proc. of the Twenty Nine Anniversary Seminar NPCS'2022*. – 2022. – Vol. 28. – P. 210–218.
10. Острейковский, В. А. Безопасность атомных станций. Вероятностный анализ / В. А. Острейковский, Ю. В. Швыряев. – М.: Физматлит, 2008. – 352 с.
11. Mikhalycheva E. Probabilistic Safety Assessment of Spent Fuel Pool Cooling System Taking Into Account Internal Events and Internal Hazards / E. Mikhalycheva // *Nonlinear Dynamics and Applications: Proc. of the Twenty Eight Anniversary Seminar NPCS'2021*. – 2021. – Vol. 27. – P. 315–322.

References

1. Morozov A. V., Remizov O. V., Kalyakin D. C., Asiunin V. I., Schekoldin V. I., Zaitcev S. I., Zakutaev M. O. Verification of TECH-M and KORSAR/GP Computer Codes on the Basis of Experimental Results Obtained on Large-scale Test Facility GE2M-PG. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2012, no. 3, pp 129–139 (in Russian).
2. Kavun O. Yu., Pipchenko G. R. Development of methodology for primary circuit pressure calculations in case of large break loss of coolant accident in models for rapid assessment for information analytical center of Rostechнадзор. *Nuclear and Radiation Safety*, 2020, no. 3(97), pp. 23–31 (in Russian). <https://doi.org/10.26277/SECNRS.2020.97.3.003>
3. Zholnerovich A. Yu. Analysis of accidents with loss of coolant. *Aktual'nye problemy energetiki – 2022: materialy studencheskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Actual Problems of Energy – 2022: Materials of the Student Scientific and Technical Conference]. Minsk, BTSU, 2022, pp. 350–354 (in Russian). Available at: <https://rep.bntu.by/handle/data/126012> (accessed 15 January 2024).
4. Belozerov V. I., Zuk M. M., Geraskin N. I. *Accident and Transient Regimes at the NPP with VVER-1000 Reactor*. Moscow, TSNU MIFI, 2019. 176 p. (in Russian).
5. Borysiewicz M., Bronowska K., Kopka P., Kowal K., Kwiatkowski T., Prusiński A. M., Prusiński P. A., Siess G. The PSA analysis of PWR emergency coolant injection availability following SBLOCA. *Nukleonika*, 2013, vol. 58, no. 2, pp. 307–316.
6. Ameyaw F., Abrefah R., Yamoah S., Birikorang S. Analysis and Estimation of Core Damage Frequency of Flow Blockage and Loss of Coolant Accident: A Case Study of a 10 MW VV-type Research Reactor – PSA Level 1. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2021, vol. 2021, art. ID 9423176. 17 p. <https://doi.org/10.1155/2021/9423176>
7. Hirata D. M., Sabundjian G. Estimative of core damage frequency in IPEN's IEA-R1 research reactor due to the initiating events of loss of flow caused by channel blockage and loss of coolant caused by large rupture in the pipe of the primary circuit PSA Level 1. *2011 International Nuclear Atlantic Conference – INAC 2011 Belo Horizonte, MG, Brazil, October 24–28, 2011*. Available at: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105222.pdf (accessed 15 January 2024).
8. Ryabinin I. A., Strukov A. V. Quantitative examples of safety assessment using logical-probabilistic methods. *International Journal of Risk Assessment and Management (IJRAM)*, 2018, vol. 21, no. 1/2, pp. 4–20. <https://10.1504/IJRAM.2018.10011305>
9. Mikhalycheva E., Artemyeva K. Probabilistic Safety Analysis of the Large LOCA Accident in the VVER-Reactor Plant. *Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the Twenty Nine Anniversary Seminar NPCS'2022*, 2022, vol. 28, pp. 210–218.
10. Ostreikovskii V. A. *Safety of Nuclear Power Plants. Probabilistic Safety Analysis*. Moscow, Fismatlit Publ., 2008. 352 p. (in Russian).
11. Mikhalycheva E. Probabilistic Safety Assessment of Spent Fuel Pool Cooling System Taking Into Account Internal Events and Internal Hazards. *Nonlinear Dynamics and Applications: Proceedings of the Twenty Eight Anniversary Seminar NPCS'2021*, 2021, vol. 27, pp. 315–322.